



Universidad Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

**TRABAJO DE FIN DE GRADO EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

Modelo numérico para impactos de alta velocidad en blindajes cerámico/metálicos

Autor: *Ignacio Alvarelllos Pérez*

Tutor: *Jorge López Puente*

Leganés, Septiembre 2015

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción histórica.....	2
1.1.1.- Evolución histórica de blindajes protectores	2
1.1.2.- Origen de los blindajes ligeros modernos	5
1.1.3.- Desarrollo de los blindajes ligeros actuales	8
1.2.- Objetivos	11
1.3.- Contenido.....	12
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES	13
2.1.- Introducción a los materiales cerámicos.....	14
2.2.- Caracterización mecánica de los materiales	18
2.2.1.- Resistencia al impacto	18
2.2.2.- Ensayos de impacto	19
2.2.2.1.- Ensayos Cuasi-estáticos	20
2.2.2.2.- Ensayos dinámicos	22
2.2.2.3.- Ensayo de fractura	28
2.3.- Diseño de blindajes ligeros.....	29
2.3.1.- Penetración y límite balístico	29
2.3.2.- Herramientas de diseño de blindajes	31
2.3.2.1.- Método empírico	31
2.3.2.2.- Modelización numérica.....	31
2.3.2.3.- Modelización analítica	32
2.4.- Comportamiento de blindajes de cerámica-metal bajo cargas impulsivas	33

CAPÍTULO 3: MODELO NUMÉRICO	37
3.1.- Introducción a la modelización numérica.....	38
3.2.- Hipótesis del modelo numérico	38
3.2.1.- Caracterización de los materiales	38
3.2.1.1.- Materiales cerámicos	39
3.2.1.2.- Materiales metálicos.....	41
3.3.- Modelización del impacto	43
3.3.1.- Geometría del ensayo.....	44
3.3.2.- Propiedades de los materiales.....	47
3.3.3.- Ensamblado del conjunto.....	50
3.3.4.- Interacciones	50
3.3.5.- Condiciones del problema	52
3.3.5.1.- Condiciones de contorno.....	52
3.3.5.2.- Condiciones iniciales.....	53
3.3.6.- Mallado	53
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	59
4.1.- Introducción	60
4.2.- Validación del modelo numérico.....	60
4.2.1.- Velocidades y longitudes residuales	60
4.2.2.- Evolución de la velocidad en función del tiempo	63
4.2.3.- Comparación de blindajes	64
4.2.4.- Límite Balístico	67
4.2.5.- Deceleración y Fuerza	69
4.2.6.- Comportamiento del modelo numérico	71
CAPÍTULO 5: OTROS ESTUDIOS.....	75
5.1.- Introducción	76
5.2.- Impactos oblicuos	76
5.2.1.- NATO 50º	76
5.2.2.- NATO 60º	82

5.3.- Validación numérica de ecuación analítica para la Velocidad del Límite Balístico (BLV).....	90
CAPÍTULO 6: PRESUPUESTO	93
6.1.- Presupuesto del proyecto.....	94
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	95
7.1.- Conclusiones.....	96
7.2.- Trabajos futuros	98
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA	99
APÉNDICE A: Programación del material cerámico en el archivo de datos generado por Abaqus.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1.1.- IZQUIERDA: PROTECCIÓN DE UN ARMADILLO COMÚN. DERECHA: ESTRUCTURA ÓSEA SEMI-ACORAZADA DE UN PLACODERMI (REPRESENTACIÓN ARTÍSTICA).....	2
FIGURA 1.1.2.- IZQUIERDA: SCUTUM ROMANO DE MADERA, CUERO Y BRONCE. DERECHA: DYPLON ESPARTANO DE BRONCE.....	3
FIGURA 1.1.3.- IZQUIERDA: FORTALEZA DE SARZANA, MURALLA DE PÓLVORA CON CAMBIOS DE DIRECCIÓN EN LOS PAÑOS Y REFUERZOS EN LA ESQUINAS. DERECHA: MURALLA DE LUGO, MURALLA TRADICIONAL CON ESCASOS CAMBIOS DE DIRECCIÓN EN LOS PAÑOS.	5
FIGURA 1.1.4.- IZQUIERDA: M4 SHERMAN AMERICANO. DERECHA: PANZER VI TIGER ALEMÁN.....	6
FIGURA 1.1.5.- ESPESOR DE UN BLINDAJE DE ACERO CONVENCIONAL NECESARIO PARA DETENER UN PROYECTIL 7.62 MM OTAN PERFORANTE.....	9
FIGURA 1.1.6.- EJEMPLO DE UN BLINDAJE CERÁMICO/METAL CON UNA UNIÓN MEDIANTE UNA CAPA ADHESIVA.....	10
FIGURA 2.1.1.- MÓDULO DE ELASTICIDAD FRENTE A LA DENSIDAD EN DISTINTOS MATERIALES	15
FIGURA 2.1.2.- DENSIDAD AREAL FRENTE A COSTO RELATIVO AL ACERO RHA EN BLINDAJES RESISTENTES AL IMPACTO DEL PROYECTIL 7.62 MM OTAN PERFORANTE (SERGE ABRATE 2011).	16
FIGURA 2.2.1.- GRÁFICA TIPO DE ENSAYO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN Y DEL TIEMPO DE DURACIÓN DEL ENSAYO.	19
FIGURA 2.2.2.- DE IZQUIERDA A DERECHA: CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN OBTENIDA A TRAVÉS DE UN ENSAYO DE TRACCIÓN, COMPARACIÓN ENTRE CURVA TENSIÓN-DEFORMACIÓN A TRACCIÓN Y A COMPRESIÓN Y EJEMPLO DE TRACCIÓN SIMPLE-COMPRESIÓN SIMPLE (LAMO Y ZAHR 2014).	21
FIGURA 2.2.3.- IZQUIERDA: CONFIGURACIÓN DE CARGA Y ROTURA DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAMETRAL. DERECHA: DESPLAZAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN APLICADA (PÉREZ, MIRÓ Y MARTÍNEZ 2006; CEPEDA 2004)	21
FIGURA 2.2.4.- IZQUIERDA: ESQUEMA DE UN ENSAYO DE FLEXIÓN DE DOBLE APOYO Y CARGA PUNTUAL. DERECHA: CROQUIS EXPLICATIVO DE LA APARICIÓN DE TENSIONES DE TRACCIÓN Y COMPRESIÓN EN UN ENSAYO DE FLEXIÓN.....	22

FIGURA 2.2.5.- GEOMETRÍA NORMALIZADA DE LA PROBETA PARA ENSAYOS CHARPY (A) E IZOD (B) SEGÚN NORMATIVA ASTM D370/ISO 148-1/EN 10015-1.....	23
FIGURA 2.2.6.- GEOMETRÍA NORMALIZADA DE UN ENSAYO CHARPY SEGÚN NORMATIVA ASTM D370/ISO 148-1/EN 10015-1.....	23
FIGURA 2.2.7.- CONFIGURACIÓN Y INSTRUMENTACIÓN PARA UN ENSAYO CHARPY (A) E IZOD (B).....	24
FIGURA 2.2.8.- IZQUIERDA: POSIBLE CONFIGURACIÓN DE ENSAYO. DERECHA: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS ANALIZADOS POR EL ORDENADOR.	24
FIGURA 2.2.9.- ESQUEMA DE LA INSTRUMENTACIÓN PARA ENSAYOS CON TORRE DE CAÍDA DE PESO.	25
FIGURA 2.2.10.- EQUIPO INSTRUMENTADO PARA ENSAYOS DE MÁQUINA DE TRACCIÓN DINÁMICA.....	25
FIGURA 2.2.11.- ESQUEMA DE UN ENSAYO A FLEXIÓN MEDIANTE UNA BARRA HOPKINSON.	26
FIGURA 2.2.12.- DETALLE DE LA DISPOSICIÓN DE LA PROBETA DE ENSAYO Y EL INSTRUMENTADO UTILIZADO EN UN ENSAYO DE FLEXIÓN MEDIANTE UNA BARRA HOPKINSON.	26
FIGURA 2.2.13.- ESQUEMA DE LA DISPOSICIÓN DE UN ENSAYO DE IMPACTO CON CAÑÓN DE GAS.....	27
FIGURA 2.2.14.- EJEMPLOS DE DISTINTAS DISPOSICIONES Y GEOMETRÍAS DE PROBETA PARA UN ENSAYO DE FRACTURA.	28
FIGURA 2.3.1.- CRITERIOS DE PENETRACIÓN Y PERFORACIÓN COMPLETA SEGÚN ZUKAS ET AL. 1982.	29
FIGURA 2.3.2.- CURVA PROBABILIDAD DE PENETRACIÓN PARA UN SISTEMA PROYECTIL-OBJETIVO GENÉRICO.	30
FIGURA 2.4.1.- ESQUEMA DEL PROCESO DE FRAGMENTACIÓN Y FORMACIÓN DE LA ZONA MESSALL (UNIVERSITY OF VIRGINIA - WADLEY RESEARCH GROUP).....	34
FIGURA 2.4.2.- ESQUEMA DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE UN BLINDAJE CERÁMICO/METÁLICO. (A) FRAGMENTACIÓN, (B) PENETRACIÓN EN LA PLACA CERÁMICA, (C) PENETRACIÓN EN LA PLACA POSTERIOR METÁLICA (SERGE ABRATE 2011).....	35
FIGURA 2.4.3.- PROCESO DE PENETRACIÓN A ALTAS VELOCIDADES DE IMPACTO Y FORMACIÓN DEL “TAPÓN” METÁLICO EN UN BLINDAJE DE CERÁMICA/METAL (R. CHI ET AL. 2013).....	35

FIGURA 3.2.1.- MODELO JOHNSON-HOLMQUIST (JH-2) EN EL CUAL: (A) MODELO DE RESISTENCIA, (B) MODELO DE DAÑO Y (C) MODELO DE PRESIÓN (JOHNSON Y HOLMQUIST, 1994).....	41
FIGURA 3.3.1.- VISTA EN PERSPECTIVA (IZQUIERDA) Y EN 2D (DERECHA) DEL PROYECTIL.....	44
FIGURA 3.3.2.- COMPARACIÓN ENTRE UN PROYECTIL APDS-20 MM REAL (R. CHI ET AL. 2013) Y EL MODELO EMPLEADO EN ESTE TRABAJO.....	45
FIGURA 3.3.3.- VISTA EN PERSPECTIVA (IZQUIERDA) Y EN 2D (DERECHA) DE LA PLACA FRONTAL CERÁMICA.	45
FIGURA 3.3.4.- VISTA EN PERSPECTIVA (IZQUIERDA) Y EN 2D (DERECHA) DE LA PLACA POSTERIOR METÁLICA.	46
FIGURA 3.3.5.- CROQUIS CON LAS DIMENSIONES DE LAS PARTICIONES REALIZADAS EN LAS PLACAS.	46
FIGURA 3.3.6.- PROYECTIL APDS - 20 MM COMPLETO, INCLUYENDO LA NARIZ OJIVAL.	48
FIGURA 3.3.7.- ENSAMBLAJE DE LA SIMULACIÓN PARA UNA PLACA CERÁMICA DE 25 MM Y UNA PLACA METÁLICA DE 15 MM, EN PERSPECTIVA A LA DERECHA Y EN 2D A LA IZQUIERDA (LA LÍNEA DISCONTINUA MARCA EL EJE DE REVOLUCIÓN Y LA FLECHA LA DIRECCIÓN DEL IMPACTO).	50
FIGURA 3.3.8.- DETALLE DE LA CABEZA DEL PROYECTIL CON LAS SUPERFICIES DE ELEMENTO DE MALLA.....	51
FIGURA 3.3.9.- SUPERFICIES ESCOGIDAS PARA LA UNIÓN TIPO <i>TIE</i> , EN ROJO LA CARA INTERIOR METÁLICA Y EN ROSA LA CARA INTERIOR CERÁMICA.	52
FIGURA 3.3.10.- CONDICIONES DE CONTORNO DE EXTERIOR DE LAS PLACAS Y DE LOS PLANOS DE SIMETRÍA.....	52
FIGURA 3.3.11.- CONDICIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES DE 1240 M/S IMPUESTO AL PROYECTIL.	53
FIGURA 3.3.12.- EJEMPLO DE MALLA EMPLEADO PARA EL PRIMER ANÁLISIS DE MALLA (TAMAÑO DE LOS ELEMENTOS FINOS DE LAS PLACAS: 1MM / TAMAÑO DE LOS ELEMENTOS DEL PROYECTIL: 1MM).	54
FIGURA 3.3.13.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MALLA PARA DISTINTO NÚMERO DE ELEMENTOS DEL PROYECTIL.	55
FIGURA 3.3.14.- TIEMPO DE CÁLCULO EMPLEADO POR ABAQUS PARA SIMULAR EL PROBLEMA.....	55
FIGURA 3.3.15.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MALLA PARA DISTINTO NÚMERO DE ELEMENTOS DE LAS PLACAS.....	56
FIGURA 3.3.16.- TIEMPO DE CÁLCULO EMPLEADO POR ABAQUS PARA SIMULAR EL PROBLEMA.....	56
FIGURA 3.3.17.- MALLADO FINAL UTILIZADO EN TODOS LOS <i>TEST</i> . EN LA IMAGEN TEST-2.	57

FIGURA 4.2.1.- GRÁFICO COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA DENSIDAD AREAL DEL BLINDAJE PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE BLANCOS.....	61
FIGURA 4.2.2.- GRÁFICO COMPARATIVO DE LA LONGITUD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA DENSIDAD AREAL DEL BLINDAJE PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE BLANCOS.....	62
FIGURA 4.2.3.- GRÁFICO COMPARATIVO DE LA EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA CADA UNO DE LOS BLINDAJES EMPLEADOS EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.	63
FIGURA 4.2.4.- GRÁFICA COMPARATIVA DE LA EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA $T_c=20\text{MM}$	65
FIGURA 4.2.5.- GRÁFICA COMPARATIVA DE LA EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA $T_c=25\text{MM}$	65
FIGURA 4.2.6.- GRÁFICA COMPARATIVA DE LA EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA $T_m=10\text{MM}$	66
FIGURA 4.2.7.- GRÁFICA COMPARATIVA DE LA EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD PARA $T_m=15\text{MM}$	66
FIGURA 4.2.8.- VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA VELOCIDAD DE IMPACTO PARA EL TEST-1.	67
FIGURA 4.2.9.- VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA VELOCIDAD DE IMPACTO PARA EL TEST-2.	68
FIGURA 4.2.10.- VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA VELOCIDAD DE IMPACTO PARA EL TEST-3.	68
FIGURA 4.2.11.- VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA VELOCIDAD DE IMPACTO PARA EL TEST-4.	69
FIGURA 4.2.12.- DECELERACIONES EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD AREAL PARA CADA BLINDAJE SIMULADO.....	70
FIGURA 4.2.13.- FUERZA EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD AREAL PARA CADA BLINDAJE SIMULADO.....	71
FIGURA 4.2.14.- DETALLE DEL CAMPO TENSIONAL DE UN BLINDAJE DE 20 MM DE ALÚMINA Y 10 MM DE ALUMINIO PARA UN IMPACTO NORMAL A 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].....	72
FIGURA 4.2.15.- DETALLE DEL CAMPO TENSIONAL DE UN BLINDAJE DE 20 MM DE ALÚMINA Y 15 MM DE ALUMINIO PARA UN IMPACTO NORMAL A 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].....	72

FIGURA 4.2.16.- DETALLE DEL CAMPO TENSIONAL DE UN BLINDAJE DE 25 MM DE ALÚMINA Y 10 MM DE ALUMINIO PARA UN IMPACTO NORMAL A 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].....	73
FIGURA 4.2.17.- DETALLE DEL CAMPO TENSIONAL DE UN BLINDAJE DE 25 MM DE ALÚMINA Y 10 MM DE ALUMINIO PARA UN IMPACTO NORMAL A 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].....	73
FIGURA 4.2.18.- DETALLE DE LOS CONTORNOS DE DAÑO EN EL MATERIAL CERÁMICO EN LOS PRIMEROS MICROSEGUNDOS DEL PROCESO PARA EL MODELO JH-2 EMPLEADO.....	74
FIGURA 4.2.19.- DETALLE DE LAS PLACAS TRAS EL IMPACTO Y LA PENETRACIÓN. FORMACIÓN DEL TRONCO CÓNICO EN EL MATERIAL CERÁMICO DE UNOS 60º.....	74
FIGURA 5.2.1.- GRÁFICO COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA DENSIDAD AREAL DEL BLINDAJE PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE BLANCOS EN UN IMPACTO OBLICUO NATO 50º.	77
FIGURA 5.2.2.- GRÁFICO COMPARATIVO DE LA LONGITUD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA DENSIDAD AREAL DEL BLINDAJE PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE BLANCOS EN UN IMPACTO OBLICUO NATO 50º.....	78
FIGURA 5.2.3.- CONFIGURACIÓN Y PARTICIONES DEL MODELO DE IMPACTO OBLICUO NATO 50º.....	79
FIGURA 5.2.4.- VISTA EN EL PLANO DE SIMETRÍA DE LA MALLA EMPLEADA EN EL MODELO DE IMPACTO OBLICUO NATO 50º.	79
FIGURA 5.2.5.- CAMPO TENSIONAL PARA UN IMPACTO A 50º Y 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS CONTRA UN BLINDAJE DE 15 MM DE ALÚMINA Y 10 MM DE ALUMINIO. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].....	80
FIGURA 5.2.6.- CAMPO TENSIONAL PARA UN IMPACTO A 50º Y 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS CONTRA UN BLINDAJE DE 18 MM DE ALÚMINA Y 10 MM DE ALUMINIO. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].....	81
FIGURA 5.2.7.- CAMPO TENSIONAL PARA UN IMPACTO A 50º Y 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS CONTRA UN BLINDAJE DE 20 MM DE ALÚMINA Y 10 MM DE ALUMINIO. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].....	82

FIGURA 5.2.8.- GRÁFICO COMPARATIVO DE LA VELOCIDAD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA DENSIDAD AREAL DEL BLINDAJE PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE BLANCOS EN UN IMPACTO OBLICUO NATO 60°.	83
FIGURA 5.2.9.- GRÁFICO COMPARATIVO DE LA LONGITUD RESIDUAL DEL PROYECTIL FRENTE A LA DENSIDAD AREAL DEL BLINDAJE PARA DIFERENTES COMBINACIONES DE BLANCOS EN UN IMPACTO OBLICUO NATO 60°.	84
FIGURA 5.2.10.- CONFIGURACIÓN Y PARTICIONES DEL MODELO DE IMPACTO OBLICUO NATO 60°.	85
FIGURA 5.2.11.- VISTA EN PERSPECTIVA DE LA MALLA EMPLEADA EN EL MODELO DE IMPACTO OBLICUO NATO 60°.	86
FIGURA 5.2.12.- VISTA EN EL PLANO DE SIMETRÍA DE LA MALLA EMPLEADA EN EL MODELO DE IMPACTO OBLICUO NATO 60°.	86
FIGURA 5.2.13.- CAMPO TENSIONAL PARA UN IMPACTO A 60° Y 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS CONTRA UN BLINDAJE DE 15 MM DE ALÚMINA Y 9 MM DE ALUMINIO. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].	87
FIGURA 5.2.14.- CAMPO TENSIONAL PARA UN IMPACTO A 60° Y 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS CONTRA UN BLINDAJE DE 18 MM DE ALÚMINA Y 10 MM DE ALUMINIO. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].	88
FIGURA 5.2.15.- CAMPO TENSIONAL PARA UN IMPACTO A 60° Y 1240 M/S DE UN PROYECTIL 20 MM APDS CONTRA UN BLINDAJE DE 20 MM DE ALÚMINA Y 8 MM DE ALUMINIO. [A) 25% B) 50% C) 75% D) 100% DEL PROCESO DE PERFORACIÓN].	89
FIGURA 5.3.1.- VELOCIDAD EN EL LÍMITE BALÍSTICO (BLV) EN FUNCIÓN DEL ESPESOR NORMALIZADO DE LA PLACA FRONTAL CERÁMICA (RESULTADOS ANALÍTICOS, EC. VELOCIDAD DE LÍMITE BALÍSTICO (P. 90), Y SIMULADOS).	91
FIGURA 5.3.2.- VELOCIDAD EN EL LÍMITE BALÍSTICO (BLV) EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD AREAL NORMALIZADA DE LA PLACA FRONTAL CERÁMICA (RESULTADOS ANALÍTICOS, EC. VELOCIDAD DE LÍMITE BALÍSTICO (P. 90), Y SIMULADOS).	92

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.2.1.-	PROPIEDADES DE LOS ENSAYOS MÁS COMUNES EN LA CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE APLICACIÓN, DONDE E ES LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN.....	20
TABLA 2.2.2.-	COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL PROYECTIL.	27
TABLA 3.3.1.-	CONFIGURACIÓN DE ESPESORES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES DE UN BLINDAJE CERÁMICO-METAL CON UN PROYECTIL TIPO APDS DE 20 MM (SÁNCHEZ GÁLVEZ Y SÁNCHEZ PARADELA 2009).....	44
TABLA 3.3.2.-	CONSTANTES DEL TUNGSTENO UTILIZADAS EN LA SIMULACIÓN.....	47
TABLA 3.3.3.-	CONSTANTES DE LA ALÚMINA UTILIZADAS EN LA SIMULACIÓN.	49
TABLA 3.3.4.-	CONSTANTES DEL ALUMINIO (AL 5083-H116) UTILIZADAS EN LA SIMULACIÓN. ...	49
TABLA 4.2.1.-	DIFERENCIA DE LA VELOCIDAD RESIDUAL ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y EL MODELO NUMÉRICO.....	61
TABLA 4.2.2.-	DIFERENCIA DE LA LONGITUD RESIDUAL ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y EL MODELO NUMÉRICO.....	63
TABLA 5.2.1.-	CONFIGURACIÓN DE ESPESORES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES DE UN BLINDAJE CERÁMICO-METAL CON UN PROYECTIL TIPO APDS DE 20 MM PARA UN IMPACTO OBLICUO NATO 50º (SÁNCHEZ GÁLVEZ Y SÁNCHEZ PARADELA 2009).....	77
TABLA 5.2.2.-	DIFERENCIA DE LA VELOCIDAD RESIDUAL ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y EL MODELO NUMÉRICO PARA UN IMPACTO NATO 50º.	78
TABLA 5.2.3.-	DIFERENCIA DE LA LONGITUD RESIDUAL ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y EL MODELO NUMÉRICO PARA UN IMPACTO NATO 50º.	79
TABLA 5.2.4.-	CONFIGURACIÓN DE ESPESORES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES DE UN BLINDAJE CERÁMICO-METAL CON UN PROYECTIL TIPO APDS DE 20 MM PARA UN IMPACTO OBLICUO NATO 60º (SÁNCHEZ GÁLVEZ Y SÁNCHEZ PARADELA 2009).....	83
TABLA 5.2.5.-	DIFERENCIA DE LA VELOCIDAD RESIDUAL ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y EL MODELO NUMÉRICO PARA UN IMPACTO NATO 60º.	84
TABLA 5.2.6.-	DIFERENCIA DE LA LONGITUD RESIDUAL ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y EL MODELO NUMÉRICO PARA UN IMPACTO NATO 60º.	85
TABLA 6.1.1.-	PRESUPUESTO TOTAL PARA LA EJECUCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.	94

TABLA A.1.-	PARÁMETROS DE LA LÍNEA 1 DEL MODELO CERÁMICO.....	107
TABLA A.2.-	PARÁMETROS DE LA LÍNEA 2 DEL MODELO CERÁMICO.....	107
TABLA A.3.-	PARÁMETROS DE LA LÍNEA 3 DEL MODELO CERÁMICO.....	107
TABLA A.4.-	PARÁMETROS DE LA LÍNEA 4 DEL MODELO CERÁMICO.....	108
TABLA A.5.-	OPCIONES DE SALIDA DE LOS ELEMENTOS PARA EL MODELO CERÁMICO.	108

RESUMEN

MODELO NUMÉRICO PARA IMPACTOS DE ALTA VELOCIDAD EN BLINDAJES CERÁMICO/METÁLICOS

Los blindajes bi-capa, o blindajes de dos materiales, han sido objeto de atención desde hace varias décadas por sus altos niveles de protección balística, así como por su reducido peso. Consisten en una placa exterior de alta dureza y una capa posterior con un comportamiento dúctil, con el objetivo de que la primera debilite y decelere el proyectil y la segunda mantenga en su sitio los restos fracturados de la placa delantera y absorba la energía residual del proyectil. El conocimiento de estos sistemas de protección es de mucho interés en el ámbito militar, en el aeronáutico, y otros campos, dado el desarrollo reciente de materiales que pueden ser de relevancia para diseñar nuevos blindajes ligeros con prestaciones mejoradas según las características que ofrezca cada uno. Para llegar a buen fin en el desarrollo del trabajo, es importante que el diseñador de blindajes posea un gran nivel de conocimiento del comportamiento mecánico de los materiales con los que se va a trabajar, fundamentalmente los criterios de fallo o rotura.

En este Trabajo Fin de Grado se estudia el comportamiento de elementos de protección ligeros de doble capa, compuestos por una placa cerámica frontal respaldada por otra metálica, frente a altas sollicitaciones dinámicas. Para ello, se ha utilizado el Método de Elementos Finitos (FEM) para generar un modelo de simulación numérica con el código comercial explícito Abaqus, que ha permitido validar los resultados experimentales propuestos por Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela (2009).

Además, se han comparado los resultados obtenidos con los expuestos en el modelo numérico propuesto de R. Chi et al. (2012), que se utiliza para relacionar y analizar las velocidades residuales y la velocidad de límite balístico con los espesores de placa empleados. Además se ha intentado validar una serie de curvas analíticas para el cálculo de la velocidad de límite balístico (BLV) propuestas por los mismos.

Finalmente, se ha estudiado el comportamiento de los blindajes cerámico/metálicos para diferentes sollicitaciones y condiciones de contorno.

ABSTRACT

NUMERICAL MODEL FOR HIGH SPEED IMPACTS ON CERAMIC/METAL BI-LAYER ARMOURS

Bi-layer shields have received attention for several decades due to their high ballistic protection levels, as well as its reduced weight. These shields have an outer plate of high hardness and a rear layer with a ductile behaviour. The first layer weakens and decelerates the projectile whereas the second layer keeps in place the fractured remains of the front plate and absorbs the residual energy of the projectile. The knowledge of these protection systems has interest in the military sector, in aeronautics and other fields, as there are recent materials that may be of relevance for new light shielding with improved performance arising from the features that gives each layer. For a good development of the shield, the designer should have a high level of knowledge of the mechanical behaviour of these materials, mainly the failure or breakage criteria.

In this work, we analyse the behaviour of light bi-layer shields as protective elements, with a ceramic front plate backed by another metallic layer, under high dynamic loads. We use the Finite Elements Method (FEM) in order to generate a model of numerical simulation with the commercial code Abaqus/Explicit. We have validated the experimental results by Sánchez Gálvez and Sanchez Paradela (2009).

We have also compared our results with those obtained by the numerical model proposed by R. Chi et al. (2012), used to relate and analyze the residual speeds and the ballistic limit speed with the thickness of the bi-layer plates. Moreover, we have attempted to validate their proposed analytical curves for the calculation of the ballistic limit velocity (BLV).

Finally, we have studied the behaviour of the ceramic/metal shields for different loads and boundary conditions.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción histórica

1.1.1.- Evolución histórica de blindajes protectores

La protección como método de supervivencia, tanto individual como colectiva, es un instinto básico de todos los animales. Las mejores protecciones de las que disponen los animales son las de su propio cuerpo, ya sean por ejemplo corazas como en el caso de un armadillo, caparazones como las tortugas, espinas como los erizos o exoesqueletos en el caso de los artrópodos. Aparte de estas existen otros muchos tipos de mecanismos de defensa en los animales, véase el camuflaje, la distracción, el aumento corporal, el veneno, etc.

La utilización de estas defensas por los animales no es algo reciente, existen especies extintas de peces prehistóricos (Placodermi) que disponían de un cuerpo parcial o totalmente acorazado. También existieron especies de trilobites que poseían exoesqueletos, los cuales mudaban y fortalecían a lo largo de su vida, que tenían diferentes funciones aparte de la propia protección, como la respiración o como sostén del cuerpo del animal, mejorando así la eficacia de la musculatura.

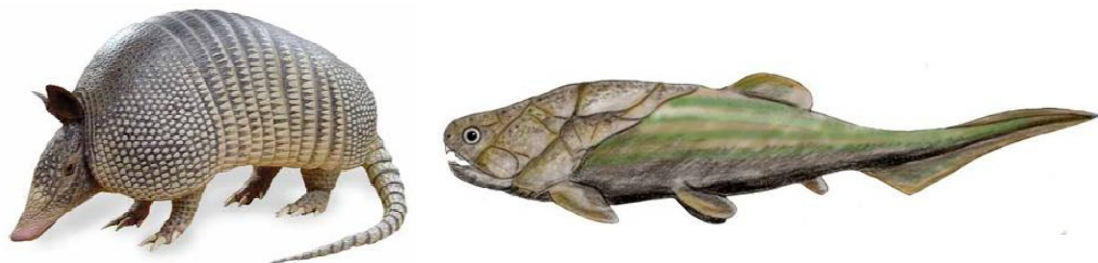


Figura 1.1.1.- Izquierda: Protección de un armadillo común. Derecha: estructura ósea semi-acorazada de un Placodermi (representación artística).

De la misma manera, el hombre siempre ha buscado diferentes formas de asegurar su seguridad y la de sus congéneres. Esta tarea no es baladí cuando hablamos de civilizaciones guerreras y exploradoras situadas cronológicamente hacia el año 3000 a.C., con una tecnología elemental en sus manos. En estas remotas fechas, el desarrollo de sistemas de protección se basaba principalmente en la mejora de dos elementos, los escudos y las murallas.

- **El escudo**

El escudo es el arma defensiva más utilizada de todos los tiempos, y es una de las piezas más icónicas de las antiguas culturas (Fernando Quesada Sanz 2009). Tanto romanos como espartanos, junto a muchas otras civilizaciones, centraban su sistema de lucha en el escudo. Los romanos con su famosa formación tortuga y los espartanos con una formación, más arcaica aunque efectiva, en falange. Pero, ¿qué les diferenciaba en cuanto al tipo de escudo se refiere? El espacio geográfico y temporal suponen la principal barrera entre unas y otras civilizaciones, de manera que las diferencias están garantizadas desde el armamento militar hasta la propia sociedad.

Los primeros vestigios de escudos los encontramos en la zona de Mesopotamia, utilizados por la civilización sumeria alrededor del año 3000 a.C. Estos utilizaban el cuero como material principal del escudo, hacían los escudos superponiendo capas de cuero tratado para aportarle cierta resistencia al impacto de flechas o espadas. El sucesor del cuero fue el lino, los primeros escudos de la antigua Grecia estaba compuestos de este material, que con tratamientos previos de la misma manera que el cuero, adquiriría una buena resistencia. Como añadido a estos materiales primitivos entraron los metales, por ejemplo, los sumerios reforzaban sus escudos de cuero poniendo en la zona exterior del escudo unos discos de cobre. Esta mejora se puede considerar la primera aplicación de un blindaje de doble capa.



Figura 1.1.2.- Izquierda: Scutum romano de madera, cuero y bronce. Derecha: Dyplon espartano de bronce.

La comprobación de la efectividad de los metales dúctiles en los escudos dio inicio a la carrera de la metalurgia, de manera que el desarrollo de los escudos se basó en la mejora y descubrimiento de nuevos metales. Se siguieron utilizando escudos

construidos íntegramente de cobre, al que le siguió el bronce que era más resistente y aportaba mayor protección. Finalmente, en civilizaciones posteriores se generalizó el uso del hierro y el acero.

Desde la aparición de las armas de fuego personales y su difusión, el uso de los escudos deja de ser efectivo en las guerras, aunque en la actualidad se siguen utilizando como elemento de contención y protección de la policía. Los materiales utilizados actualmente son plásticos duros y transparentes (como el policarbonato), que permiten resistir impactos y ver a través de él, aportando un punto más de protección.

Por otra parte, el desarrollo, evolución y utilización de diferentes materiales en las armaduras está ligado al de los escudos. La idea de la armadura se podría expresar como un intento del ser humano por imitar a la naturaleza: la armadura como exoesqueleto artificial para la protección del cuerpo.

- **La muralla**

La muralla se trata del elemento de defensa básico de un asentamiento. Las primeras construcciones de murallas tienen su origen en la prehistoria y han progresado durante los siglos debido a las guerras y al crecimiento de las ciudades. El propósito principal de una muralla es el amparo de una ciudad o pueblo. Las primeras obras de murallas que se conservan están construidas a base de piedras, ladrillos o algún tipo de cemento aunque también existieron algunas hechas a base de madera, de las cuales muchas de ellas no se conservan a causa de la biodegradabilidad de la madera, los incendios, etc. Antes de la existencia de la pólvora, en Europa las murallas eran construcciones simples, muros de apenas unos metros de anchura que tenían diversas funciones aparte de la defensiva, como el comercio a través de sus puertas, la muestra de poder, separación de los réprobos sociales, etc. Con la llegada de la pólvora este tipo de murallas quedaron defensivamente obsoletas y el concepto de muralla sufre un drástico cambio en su diseño. Se recurre a diversos métodos de mejora, el primero de estos, y más obvio, es el ensanchar el muro, el siguiente es el construirlas más bajas, para que fuera más difícil alcanzarlas a distancia, y por último se procuró hacer construcciones más complicadas, con diversos cambios de dirección de los paños de la muralla, y aumentando cuantitativamente los refuerzos de las esquinas.



Figura 1.1.3.- Izquierda: Fortaleza de Sarzana, muralla de pólvora con cambios de dirección en los paños y refuerzos en la esquinas. Derecha: Muralla de Lugo, muralla tradicional con escasos cambios de dirección en los paños.

Con el posterior desarrollo de las armas de fuego y el descubrimiento de otros explosivos las murallas quedaron totalmente en desuso. El residuo de las murallas en la actualidad, en uso militar, son los búnkeres. Se trata de construcciones bastante sencillas de paredes gruesas hechas a base de hierro y hormigón, materiales baratos y manejables, diseñados para soportar las cargas de explosiones y de proyectiles de gran calibre.

1.1.2.- Origen de los blindajes ligeros modernos

Tras esta breve introducción histórica podemos abstraer que uno de los estudios más básicos, y a su vez clave para el diseño de dispositivos de protección, es el diseño de las infraestructuras utilizadas para la protección tanto personal como colectiva, así como la mejora de los materiales empleados.

Este estudio se ha visto especialmente impulsado a lo largo del siglo XX, tristemente, a causa de las guerras. Durante la Primera Guerra Mundial, el desarrollo y mejora de los motores de combustión y de armas explosivas o de gran calibre junto con la necesidad de transportar tropas entre trincheras dio lugar al diseño de un nuevo tipo de vehículo blindado. En primera instancia no era más que un vehículo de transporte al que finalmente se le dotó de un cañón.

Pero, ¿qué sucede si se aumentaba la potencia de fuego y no el blindaje del propio vehículo? Este era uno de los grandes problemas que tuvieron los estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial (SGM), pues los tanques alemanes superaban

ampliamente las capacidades, tanto defensivas como ofensivas, de los americanos (Paul Kennedy 2014). De hecho, no es, realmente, hasta la SGM cuando empiezan a darse combates entre tanques en campo abierto. Esta amenaza alemana provocó el comienzo del estudio de nuevos materiales más ligeros y resistentes por parte de los ingenieros americanos.



Figura 1.1.4.- Izquierda: M4 Sherman americano. Derecha: Panzer VI Tiger alemán.

Durante las décadas posteriores a la SGM la situación de los vehículos blindados cambió rápidamente. El desarrollo de armas más eficientes, como los proyectiles de energía cinética, las cargas huecas y los proyectiles formados mediante explosión (EFP), que permiten atravesar prácticamente un metro de blindaje de acero laminado, provocó cierta inquietud en los ingenieros, pues los tanques diseñados hasta entonces eran totalmente vulnerables a proyectiles de uso manual. Es entonces cuando se impone un concepto innovador en el diseño de blindajes, al introducirse tanto el uso de blindajes reactivos como la utilización de materiales de blindaje avanzados, como los cerámicos y los materiales compuestos. Se mejoró de esta manera la protección y se redujo el espesor y, en definitiva, el peso del blindaje en comparación con los aceros de alta resistencia empleados anteriormente (Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela 2008).

En la actualidad, la investigación en el campo del desarrollo de nuevos materiales y blindajes ligeros está encabezada por las industrias aeronáutica, aeroespacial y militar. El estudio de estos blindajes está enfocado principalmente en su capacidad protectora, en su coste y en su densidad por unidad de área. La importancia de estos requerimientos depende directamente de las características del sistema a proteger.

Así, en el caso de los búnkeres, mencionados anteriormente, el peso no es un factor determinante y se suelen utilizar materiales baratos, aumentando la resistencia con grosores mayores.

El peso, sin embargo, es un factor clave en el diseño de materiales para la protección de objetos que necesitan moverse: sistemas de protección personal, vehículos terrestres y aeronaves civiles o militares.

- Armaduras personales

En las armaduras personales la reducción de peso es extremadamente importante, pues la movilidad es esencial para el usuario.

- Vehículos terrestres

Desde el final de la Guerra Fría, la difusión de conflictos en diferentes puntos del globo se ha visto acrecentada. El despliegue de los Cascos Azules en zonas de conflicto afronta amenazas como minas, artefactos explosivos improvisados, impacto de proyectiles de pequeño y mediano calibre, etc. Por otra parte, las tropas han de ser transportadas y desplazadas en el menor tiempo posible, por lo que se requiere el uso de vehículos ligeros blindados (VLB), que pudieran ser transportados por el aire hasta el lugar indicado.

Por ello, la investigación en el campo de la protección militar ha abandonado desde hace un tiempo la búsqueda de blindajes más sofisticados capaces de soportar las amenazas del potente armamento actual, para fijarse únicamente en el desarrollo de armaduras ligeras capaces de proteger a los ocupantes de los VLB de explosiones e impactos de munición de pequeño y mediano calibre.

En definitiva, la clave del diseño de vehículos militares reside en la investigación de blindajes de protección ligera que permitan el uso de motores con menor potencia, sin sacrificar la velocidad o la maniobrabilidad del vehículo.

- Aeronaves

En aeronaves, el peso de cada componente debe ser considerado individualmente, incluyendo la densidad del fuselaje. No hay que tener en cuenta solo el ahorro de combustible que ello conlleva, sino además considerar las cargas que sufre la estructura de un avión, bastante acusadas y cíclicas, lo que puede provocar fallos debidos a fatiga. De manera que reduciendo el peso, se reduce el esfuerzo a realizar por los componentes de las aeronaves, aumentando la seguridad de las mismas (Serjouei et al. en 2015). Este factor es clave en el diseño de aviones, para evitar poner en peligro la vida de los pasajeros.

Dejando de lado el ahorro de combustible y los fallos por fatiga, un estudio básico en las estructuras aeroespaciales es el de la vulnerabilidad ante cargas de impacto, pues un fallo debido a este tipo de cargas durante el vuelo o en maniobras de despegue y aterrizaje puede ser fatal. Las situaciones más críticas son el granizo y el impacto de pájaros, tanto por su alta probabilidad de suceder como por sus desastrosas consecuencias, especialmente si son absorbidos por los motores. También el hielo desprendido del borde de la hélice de un propulsor puede impactar contra la góndola de sujeción de los motores, contra motores contiguos o contra el fuselaje, y los restos despedidos pueden impactar la zona inferior de la estructura del avión o de un ala.

De hecho, algunos de los accidentes más famosos de la historia aeroespacial se deben a estos eventos. Por ejemplo, el accidente durante el despegue del Concorde en el año 2000 fue causado por un fragmento de neumático que impactó contra un depósito de combustible del ala del avión. El resultado del impacto fue una onda de presión que se propagó a través del fluido en el depósito (que en el momento del despegue estaba lleno), aumentando la presión en las paredes, y aumentando el riesgo de fallo catastrófico en el ala; este efecto es conocido también como Ariete Hidrodinámico (HRAM) (Zaera et al. 2008). Otro ejemplo de este tipo de desastres fue el accidente del transbordador espacial Challenger en el año 1986, en el que un pedazo de goma congelada impactó contra el ala del transbordador provocando un desenlace fatal.

A parte de estos famosos accidentes, donde se ha observado inicialmente este tipo de fenómenos fue en las guerras. En la Guerra de Vietnam las aeronaves que volaban próximas al suelo eran abatidas por armas de calibre pequeño y mediano, suceso que impulsó la investigación de fuselajes más resistentes.

1.1.3.- Desarrollo de los blindajes ligeros actuales

Puesto que en este proyecto se van a analizar los blindajes cerámico-metálicos, dejaremos el uso de los materiales aeronáuticos en un segundo plano. En la actualidad el desarrollo de materiales para su empleo en blindajes ligeros tiene como mayor objetivo la protección de carros de combate, buscando máxima protección sin sacrificar movilidad.

Para reducir la vulnerabilidad, este tipo de vehículo debe ser muy maniobrable y estar convenientemente protegido contra el fuego enemigo (Jenkins 1985). Los primeros carros (1915) de combate disponían de un blindaje homogéneo laminado (*RHA – Rolled Homogeneous Armour*), que consistía en planchas de acero con una dureza que oscilaba entre 35 y 50 Rockwell C. Este tipo de blindaje era extremadamente pesado con un diseño que simplemente conseguía detener el impacto de armas manuales. Pero tanto el motor como la movilidad del vehículo se veían drásticamente reducidos. Ejemplo de este efecto se muestra en la Figura 1.1.5., la necesidad de un blindaje de espesor 15 mm de RHA para detener un proyectil 7.62 mm OTAN perforante (Ogorkiewickz 1995), una munición común de un fusil de asalto estándar de los países pertenecientes a la OTAN.

La siguiente mejora inmediata fue endurecer el acero con el que se trabajaba hasta unos niveles de entre 50 y 60 Rockwell C. (1930). De esta manera se consiguieron unas relaciones entre densidad y protección frente a una misma amenaza bastante buenos, aunque el tratamiento de endurecimiento del acero lo hacía frágil y su uso decayó principalmente por esta razón.

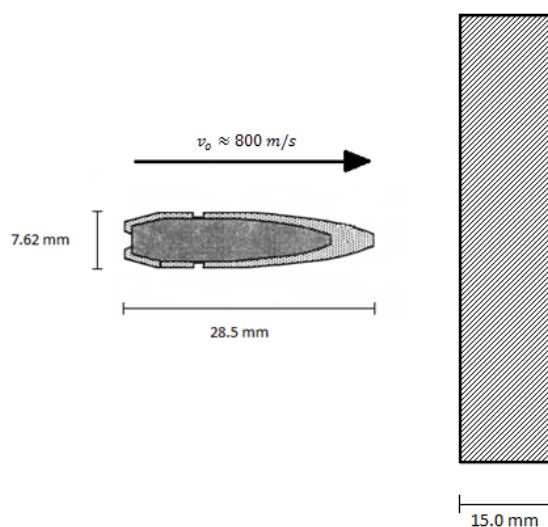


Figura 1.1.5.- Espesor de un blindaje de acero convencional necesario para detener un proyectil 7.62 mm OTAN perforante.

Así pues, el acero endurecido es especialmente eficaz aunque frágil, lo que dificulta la disipación de energía cinética por deformación plástica. Los aceros blandos, en cambio, a pesar de necesitar más densidad por unidad de área, tienen un buen comportamiento dúctil, disipando la energía cinética mediante deformación plástica. De esta manera floreció el concepto de blindajes bi-capa o blindajes de dos

materiales, que consisten en una placa exterior de alta dureza y una posterior con un buen comportamiento dúctil. Con esto se consigue que la primera placa debilite y decelere el proyectil y la segunda mantiene en su sitio los restos fracturados de la placa delantera y absorbe la energía residual del proyectil (R. Chi et al. 2013).

Este tipo de blindajes originalmente se componían de dos placas de acero de diferente dureza, pero tras la introducción del aluminio en la industria (1939) se empezaron a utilizar blindajes de acero de alta dureza respaldado por aluminio, el cual tiene unas buenas propiedades de absorción de energía cinética debido a su alta ductilidad, bastante superiores a las de acero convencional. Este sistema de blindaje es de los más empleados en la actualidad a nivel mundial, gracias a su efectividad, su bajo precio y la facilidad de fabricación de los materiales.

Aun con las ventajas aportadas por este tipo de blindajes, la máxima revolución en este campo se generó con la incorporación de materiales cerámicos a los sistemas de blindaje bi-capa (Figura 1.1.6.). Las reducciones de peso que se consiguieron con los cerámicos respecto a los blindajes convencionales de RHA llegaron a ser de un 60%. Así pues, la energía cinética del proyectil es disipada a través de: la rotura y la erosión de este, la fractura de la loseta cerámica, la deformación plástica de la placa trasera y el calor. La transmisión de energía del proyectil al blanco se debe a la generación de ondas de choque desde la parte frontal a la cara posterior del blanco (Prakash et al. - 2013).

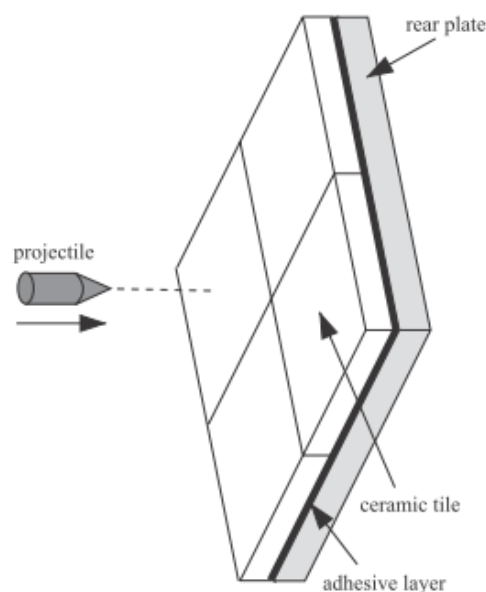


Figura 1.1.6.- Ejemplo de un blindaje cerámico/metal con una unión mediante una capa adhesiva.

Contando con la importancia que tiene el estudio de sistemas de protección, no sólo en el ámbito militar sino también en el aeronáutico y otros campos, y el alto grado de desarrollo en la ingeniería de los materiales, que en las últimas décadas ha introducido una considerable variedad de materiales novedosos, en la actualidad existe un gran interés en el estudio de distintos materiales y sus combinaciones con el ánimo de obtener nuevos blindajes ligeros con mejores prestaciones.

1.2.- Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado es conocer el comportamiento frente a altas sollicitaciones dinámicas de elementos de protección ligeros de doble capa, compuestos por una placa cerámica frontal respaldada por otra metálica. Para cumplir dicho objetivo se ha realizado, mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), un modelo de simulación numérica con el código comercial Abaqus.

El objetivo principal del trabajo se ha cumplido gracias al previo cumplimiento de diversos objetivos secundarios, entre ellos:

- Validación de los resultados experimentales propuestos por Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela en 2008 mediante el modelo numérico desarrollado.
- Comparación de resultados del modelo numérico propuesto por R. Chi et al. en 2013, que han relacionado y analizado las velocidades residuales y la velocidad de límite balístico frente a los espesores de placa empleados.
- Estudiar el comportamiento de los blindajes cerámico/metálicos para diferentes sollicitaciones y condiciones de contorno.

1.3.- Contenido

En este trabajo fin de grado se ha organizado en 7 capítulos, que se describen a continuación:

En el primer capítulo introductorio, en el cual nos hallamos, se comentan los datos históricos que han motivado a la realización del trabajo, los objetivos del mismo así como una breve introducción del trabajo que se va a realizar.

Capítulo 2: se presentan investigaciones previas de diferentes autores así como los materiales, modelos y criterios utilizados en el campo de estudio del trabajo.

Capítulo 3: se describe el modelo numérico simulado en el código informático Abaqus, analizando cada uno de los pasos realizados en el desarrollo del proceso.

Capítulo 4: se validan los resultados experimentales del artículo escogido. Además se discuten y comparan diferentes resultados de la simulación.

Capítulo 5: se muestran nuevas simulaciones, variando las condiciones iniciales del sistema proyectil-objetivo.

Capítulo 6: se muestra un presupuesto con los gastos estimados de realización del proyecto.

Capítulo 7: se exponen las conclusiones del trabajo así como los futuros trabajos a realizar.

En el último epígrafe se enumeran las referencias bibliográficas utilizadas durante la realización del trabajo.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

2.1.- Introducción a los materiales cerámicos

Los materiales cerámicos se definen como elementos inorgánicos y no metálicos, por lo general son compuestos formados por elementos metálicos y no metálicos (óxidos, nitruros y carburos) cuyos enlaces interatómicos pueden ser de carácter totalmente iónico, o bien predominantemente iónico con algún carácter covalente (Callister 2009).

Las combinaciones entre materiales cerámicos y metales mejoran las propiedades mecánicas de un conjunto blindado, en gran medida gracias a las características de los cerámicos. Las características más relevantes se recogen en la siguiente enumeración:

- Gran dureza
- Alta fragilidad
- No combustibles
- No oxidables
- Resistencia a altas temperaturas, aislante térmico
- Aislante eléctrico
- Resistencia a corrosión y agentes químicos

Aparte de estas cualidades, los materiales cerámicos se utilizan en el diseño de blindajes debido a su baja densidad, en comparación con las aleaciones metálicas más comunes en el ámbito ingenieril. En la Figura 2.1.1. (Universidad Carlos III de Madrid - OCW) se representa la densidad en función de la resistencia, donde se puede observar que la mayoría de los metales, incluyendo los de uso común, tienen una densidad superior que cualquier cerámica para un mismo módulo de elasticidad o módulo de Young.

Evaluando todas estas características puede no advertirse a simple vista que un material cerámico sea idóneo para su uso en blindajes ligeros, pues podemos conseguir metales con una densidad parecida y a un coste similar. El quid del empleo de cerámicos es su alta dureza y capacidad de abrasión contra metales. De esta manera, la función de la placa cerámica es debilitar y decelerar el proyectil, para lo que necesita un espesor, por lo general, menor que el que necesitaría una placa metálica lo que, en definitiva, reduce significativamente el peso. Es decir, la principal reducción de peso no viene dada por la diferencia de densidad entre cerámicos y metálicos, si no

más bien por la menor cantidad de material necesario para un blindaje con un mismo nivel de protección balística. La función de la placa metálica trasera, por otra parte, es mantener en su sitio los fragmentos de la placa cerámica y absorber la energía residual del proyectil, mediante deformaciones dúctiles.

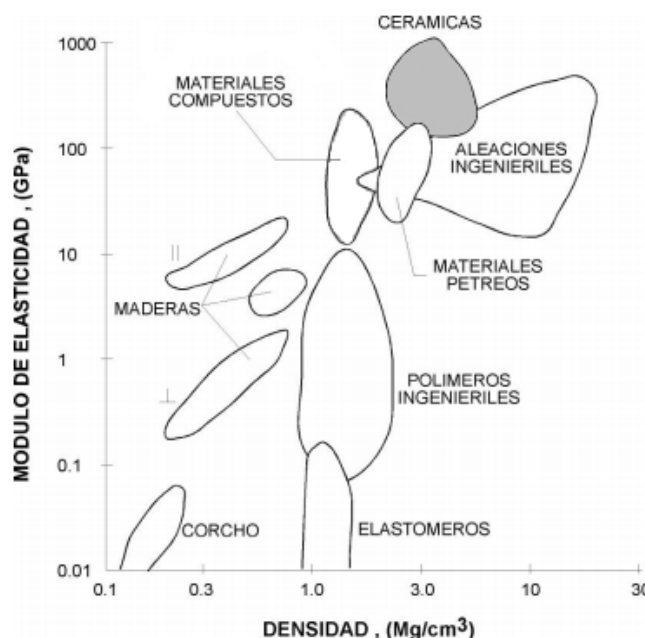


Figura 2.1.1.- Módulo de elasticidad frente a la densidad en distintos materiales .

Ya se ha comentado anteriormente la evolución histórica de los blindajes, desde las Edad Antigua hasta la Contemporánea, explicado más en profundidad los modelos de blindajes desarrollados a lo largo del último siglo. Ahora nos centraremos en el desarrollo de los materiales de los blindajes ligeros, introducidos en la ingeniería a comienzos del siglo XX.

A pesar de que las mejoras en las técnicas y en los procesos de fabricación de las cerámicas han provocado un abaratamiento en su producción, lo que a su vez ha aumentado el interés de las mismas, la utilización de materiales cada vez más avanzados implica un aumento de los costes de producción. La búsqueda de materiales más ligeros y más resistentes sin duda tiene en su contra el factor económico. Las cerámicas más desarrolladas y utilizadas en la actualidad en la industria del blindaje son:

- Alúmina (Al_2O_3)
- Nitruro de aluminio (AlN)
- Carburo de boro (B_4C)
- Carburo de silicio (SiC)

- Diboruro de titanio (TiB₂)

En la actualidad los metales, como el acero, el aluminio, el titanio, la espuma de aluminio, etc., así como materiales reforzados con fibra, como la aramida, el polietileno y otros, son utilizados como paneles traseros, aumentando la eficiencia de la protección balística, aunque siempre a un precio elevado (Figura 2.1.2.). Los paneles traseros flexibles sólo se deben utilizar en blindajes tipo “add-on”, que pueden ser fácilmente intercambiables, lo que le aporta un carácter polivalente para utilizar en diferentes vehículos. Así pues los paneles rígidos son más convenientes para blindajes integrales (Serge Abrate 2011). En la Figura 2.1.2. se puede observar la comparativa entre coste de cada material frente a su densidad por unidad de superficie, su peso en resumidas cuentas. Cuanto menor sea el peso obtenido, mayor tecnología se precisa para crear esos materiales y mayor será el precio del conjunto blindado. Esta comparativa varía en función de la densidad areal, necesaria para detener un proyectil 7.62 OTAN, en función del coste relativo de un blindaje homogéneo laminado de acero (RHA).

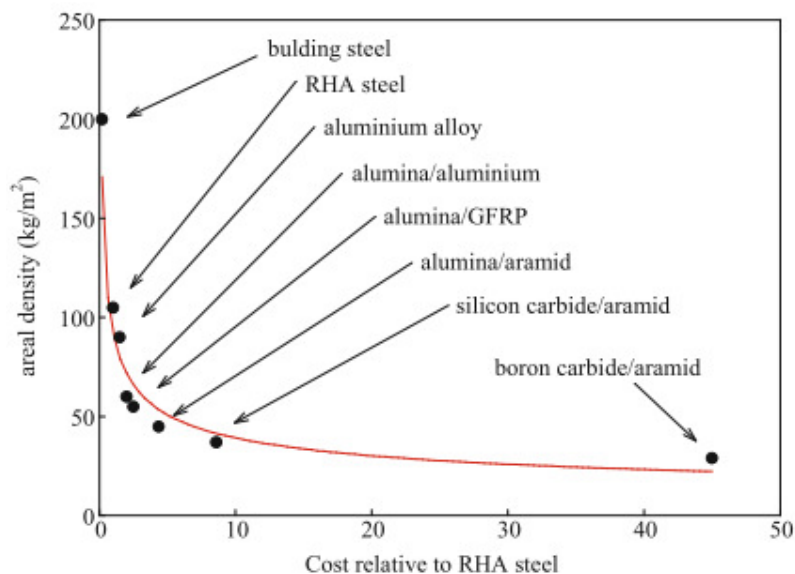


Figura 2.1.2.- Densidad areal frente a costo relativo al acero RHA en blindajes resistentes al impacto del proyectil 7.62 mm OTAN perforante (Serge Abrate 2011).

Viendo los considerables precios de los carburos, nitruros y boruros, el uso de la alúmina como material de protección es el más razonable económicamente, pues aportan la misma protección balística que otros materiales más costosos, aunque con un peso ligeramente superior:

$$\left. \begin{array}{l} \rho_{B_4C/Aramida} \approx 30 \text{ kg/m}^2 \\ \rho_{Alumina/Aluminio} \approx 60 \text{ kg/m}^2 \end{array} \right\} \text{Coste } \frac{B_4C/Aramida}{Alumina/Aluminio} \approx \frac{45}{2} = 22,5$$

El empleo de alúmina, pues, se ha generalizado en blindajes balísticos y en algunas protecciones personales para cubrir zonas vitales. En sistemas cuyo diseño sea extremadamente estricto, en cuanto a peso se refiere, se recurre a la utilización de materiales más ligeros.

Por esta razón el uso de laminados de fibras y otros **materiales compuestos** como respaldo de la placa cerámica es clave en aplicaciones en las que el peso es un factor crítico. *Se considera que un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes de manera que presente la mejor combinación posible. De acuerdo con este principio de acción combinada, las mejores propiedades se obtienen por la combinación razonada de dos o más materiales diferentes* (Callister 2009). Estos materiales son muy utilizados en la industria del blindaje, ya sea en el sector aeronáutico, en helicópteros y aviones, o en chalecos antibala e incluso en vehículos como blindaje adicional. A pesar de ello, comúnmente el diseño de protecciones con este tipo de materiales en el sector aeronáutico no cuenta con una placa cerámica, ya que las restricciones de peso no lo permiten. Se suele disponer de diferentes combinaciones de materiales compuestos y algunos metales ligeros además del empleo de espumas, estructuras en forma de panel, etc.

Dado que los blindajes cerámicos más comunes se emplean en vehículos militares, como en carros de combate, y en algunos casos puntuales en vehículos civiles e incluso espaciales, se puede inferir que los blindajes cerámica-metal son aplicables en los casos en los que se cumplan las siguientes condiciones (Zaera 1997):

- Se requiera una protección eficaz contra el impacto de proyectiles de núcleo duro a velocidades de entre 500 y 5000 m/s (Rosenberg et al. 1995).
- El peso del blindaje sea un factor restrictivo para el diseño.

Además de los materiales comentados anteriormente, fundamentados en la protección sistemas o vehículos más pesados, tenemos por otra parte las estructuras ligeras necesarias en las aeronaves. Las estructuras más comunes en la industria aeronáutica suelen estar constituidas por **materiales compuestos** de matriz plástica reforzados con fibra. De tal manera, estas fibras suelen ser de vidrio o de carbono y en ciertos casos de materiales más avanzados, según su utilidad, como fibras de boro e incluso de fibras provenientes de materiales cerámicos como el carburo de silicio (SiC) o el nitruro de silicio (Si₃N₄).

2.2.- Caracterización mecánica de los materiales

Para poder trabajar con diferentes materiales es necesario conocer su comportamiento ante las solicitaciones externas que se le apliquen, así como la relación existente entre la intensidad de estas y las deformaciones producidas, pues cada material tendrá sus características y propiedades. Así pues, para poder realizar una simulación numérica es imprescindible conocer las propiedades mecánicas de los materiales con los que se va a trabajar.

Caracterizar un material se define como la obtención de los parámetros observables principales que determinen las propiedades mecánicas de dicho material, así como las relaciones existentes entre estos parámetros (Lamo Arango y Zahr Viñuela 2014).

2.2.1.- Resistencia al impacto

En el caso de este estudio resultan especialmente interesantes las propiedades de los materiales ante cargas impulsivas o de impacto; de esta manera se muestra atrayente el concepto de resistencia a impacto.

Se define como resistencia al impacto la capacidad de un material de soportar la aplicación de una carga impulsiva sin producirse un fallo en él. Por lo tanto se puede deducir que la resistencia al impacto no es un parámetro fundamental de un material, pues es función de la geometría, el modo y la velocidad de aplicación de la carga, las propiedades del material, la atmósfera de estudio, el método de medida y, lo más importante, el criterio de fallo (Acosta 2001).

El principal método de mejora de las propiedades de un material contra la resistencia al impacto es el enriquecimiento de su tenacidad. Aunque resulta fácil averiguar el método de mejora, el desarrollo de este tipo de materiales renovados es extremadamente complejo. La fabricación de nuevos materiales depende principalmente de las geometrías requeridas, condiciones de fabricación, velocidad de enfriamiento del material, esfuerzos aplicados y la dirección del flujo fundido de material. Ya que la resistencia o tenacidad al impacto varía según el procedimiento de medida aplicado, dichas técnicas han de ser consideradas a la hora de desarrollar un nuevo material mejorado.

2.2.2.- Ensayos de impacto

Los ensayos de impacto poseen gran importancia a la hora de caracterizar un material, ya sea metálico, cerámico, plástico, etc. Los métodos clásicos de caracterización son ensayos normalizados, desarrollados en máquinas específicas para cada tipo de ensayo. Con el uso de la *Mecánica de la Fractura Elástico Lineal* (LEFM) se ha conseguido obtener resultados independientes de la geometría de la probeta (Williams 1984), pero no se consideran ensayos normalizados. La principal diferenciación entre ensayos repara en la velocidad de deformación alcanzada en el ensayo (Figura 2.2.1. y Tabla 2.2.1.).

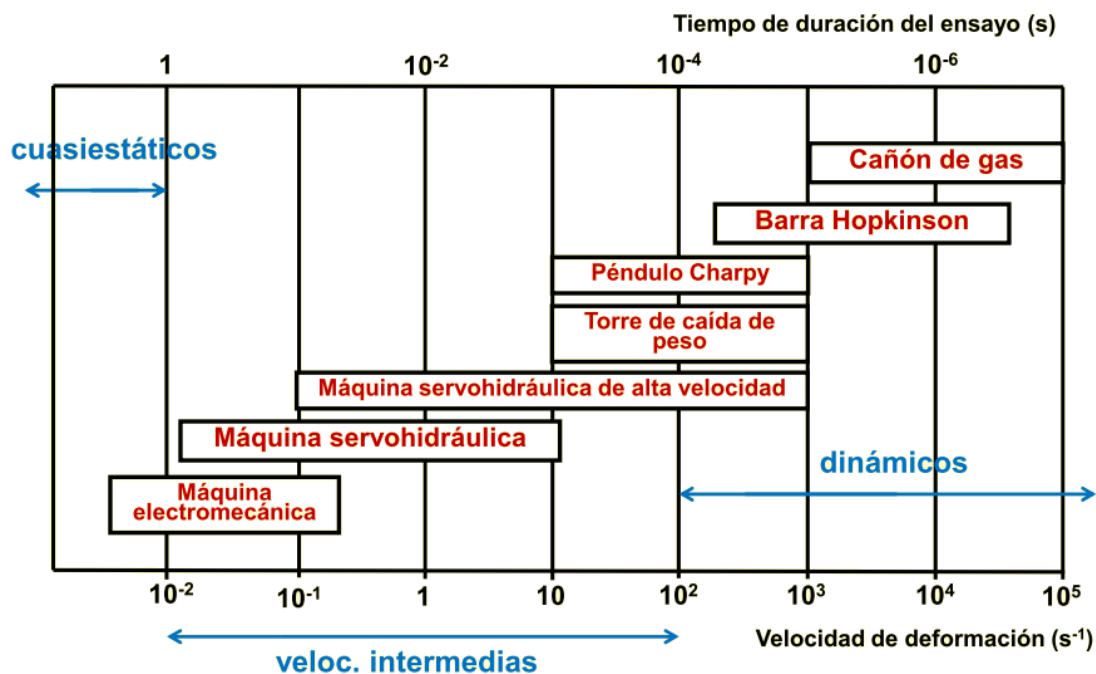


Figura 2.2.1.- Gráfica tipo de ensayo en función de la velocidad de deformación y del tiempo de duración del ensayo.

Ensayos	$\dot{\epsilon}$	Observaciones
Ensayos cuasi-estáticos	$\dot{\epsilon} < 10^{-1} \text{ s}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de las ecuaciones de Resistencia de Materiales • Generalmente son máquinas universales
Ensayos a velocidades medias	$10^{-1} < \dot{\epsilon} < 10^2 \text{ s}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> • Uso, en cierto casos, de las ecuaciones de Resistencia de Materiales • Respuesta global de la estructura • Ensayos de Charpy, Izod y torre de caída de peso
Ensayos a altas velocidades	$10^2 < \dot{\epsilon} < 10^4 \text{ s}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> • Fenómenos de propagación de ondas • Ensayos de barra de Hopkinson o cañón de gas
Ensayos a muy altas velocidades	$\dot{\epsilon} > 10^4 \text{ s}^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> • Respuesta local • Dispositivos de pirotecnia

Tabla 2.2.1.- Propiedades de los ensayos más comunes en la caracterización de un material en función de la velocidad de aplicación, donde $\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación.

2.2.2.1.- Ensayos Cuasi-estáticos

En estos ensayos las velocidades de deformación son las más bajas, están comprendidas entre 10^{-8} y 10^{-4} s^{-1} . Los más comunes son:

- Tracción/Compresión simple: se somete una probeta de sección constante a dos fuerzas uniaxiales iguales y opuestas hasta alcanzar la rotura. Información aportada por este ensayo:
 - Módulo de elasticidad
 - Límite elástico
 - Resistencia máxima
 - Relación tensión-deformación
 - Coeficiente de Poisson

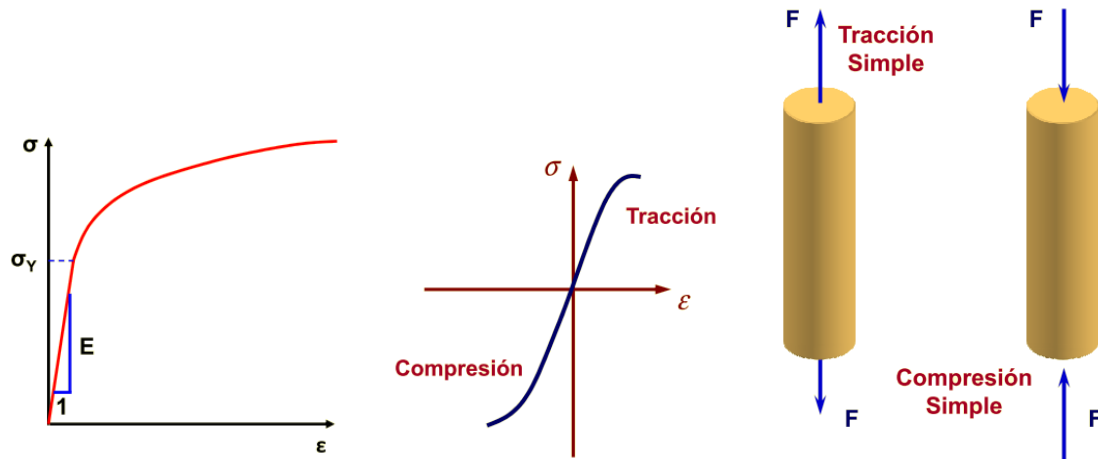


Figura 2.2.2.- De izquierda a derecha: curva tensión-deformación obtenida a través de un ensayo de tracción, comparación entre curva tensión-deformación a tracción y a compresión y ejemplo de tracción simple-compresión simple (Lamo y Zahr 2014).

- Compresión diametral: es la alternativa directa de la tracción simple, también llamado de tracción indirecta. Consiste en la aplicación de carga uniforme a lo largo de dos generatrices opuestas, de una probeta cilíndrica, hasta alcanzar la rotura. Información obtenida de un ensayo de compresión diametral:
 - Módulo de elasticidad
 - Límite elástico
 - Resistencia máxima

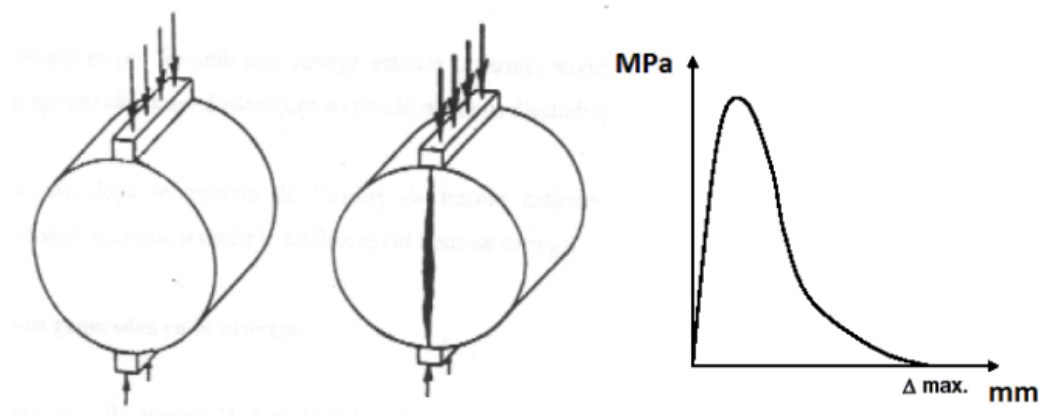


Figura 2.2.3.- Izquierda: Configuración de carga y rotura del ensayo de compresión diametral. Derecha: desplazamiento en función de la presión aplicada (Pérez, Miró y Martínez 2006; Cepeda 2004)

- Flexión: de la misma manera que en la compresión diametral, se produce simultáneamente una tracción y una compresión indirecta. Consiste en la aplicación de una o varias cargas puntuales, según la distribución escogida, sobre una probeta apoyada hasta llegar a la rotura o al límite de esfuerzo soportado por la probeta, en el cual la fuerza de resistencia disminuirá, en vez de aumentar, sin tener que producirse rotura por ello. Información aportada por este tipo de ensayos:
 - Módulo de elasticidad
 - Límite elástico
 - Resistencia máxima

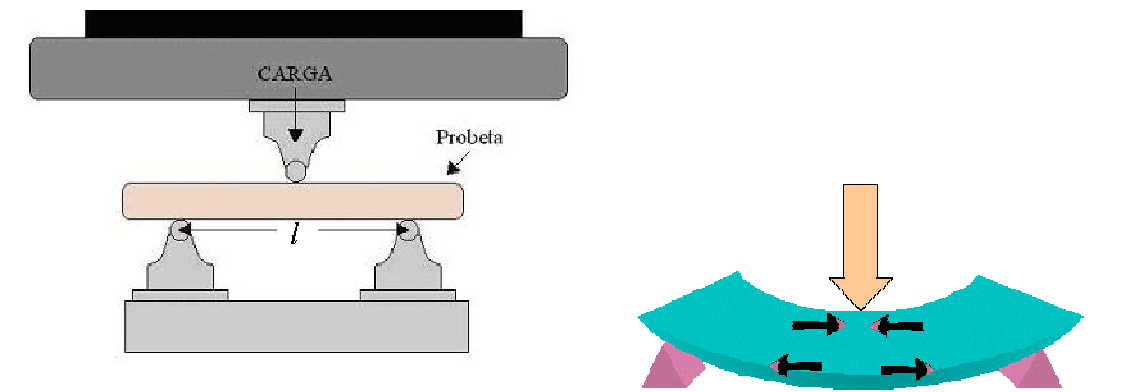


Figura 2.2.4.- Izquierda: esquema de un ensayo de flexión de doble apoyo y carga puntual. Derecha: croquis explicativo de la aparición de tensiones de tracción y compresión en un ensayo de flexión.

2.2.2.2.- Ensayos dinámicos

Los ensayos dinámicos se realizan a velocidades superiores a las de los ensayos cuasi-estáticos, las velocidades de deformación oscilan entre 10^2 y 10^6 s^{-1} . Esto conlleva que los efectos inerciales sean influyentes, los instrumentos de medida sean más complejos y la interpretación de los datos se dificulte debido al aumento en los niveles de ruido en la señal (Lamo Arango y Zahr Viñuela 2014). Los métodos de ensayos de impacto se clasifican en los siguientes procedimientos básicos:

- Péndulo Charpy e Izod: consiste en someter la probeta, del material que se está estudiando, a flexión hasta la rotura dejando caer un peso con una energía potencial conocida. En el péndulo Charpy la probeta está apoyada sobre una base en los laterales y recibe el impacto en el centro, mientras que en el método Izod la mitad de la probeta se encuentra empotrada y recibe el

impacto sobre la otra mitad libre. Este tipo de ensayos dinámicos están normalizados, tal y como se muestra en las Figuras 2.2.5. y 2.2.6. Los resultados más atractivos de estos ensayos son:

- Resistencia mecánica a flexión
- Energía absorbida hasta la rotura
- Estimación de la rigidez a flexión

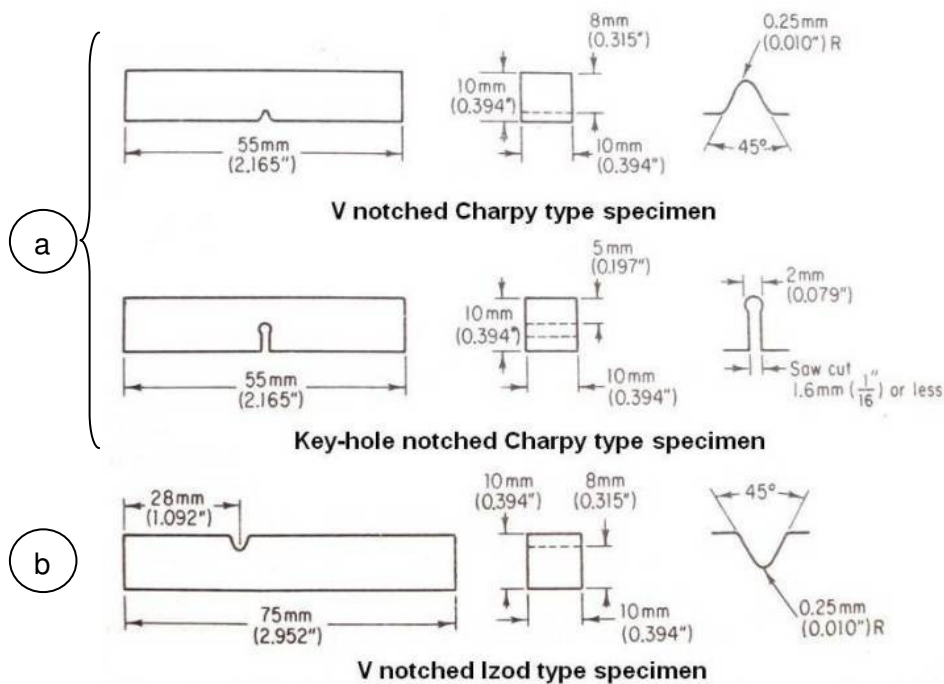


Figura 2.2.5.- Geometría normalizada de la probeta para ensayos Charpy (a) e Izod (b) según normativa ASTM D370/ISO 148-1/EN 10015-1.

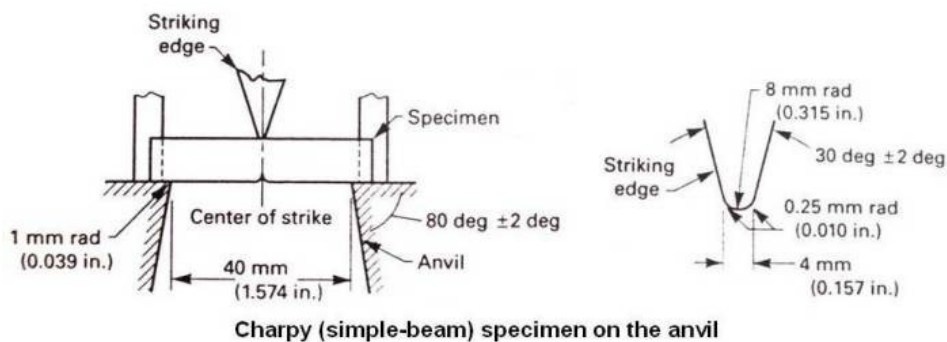


Figura 2.2.6.- Geometría normalizada de un ensayo Charpy según normativa ASTM D370/ISO 148-1/EN 10015-1.

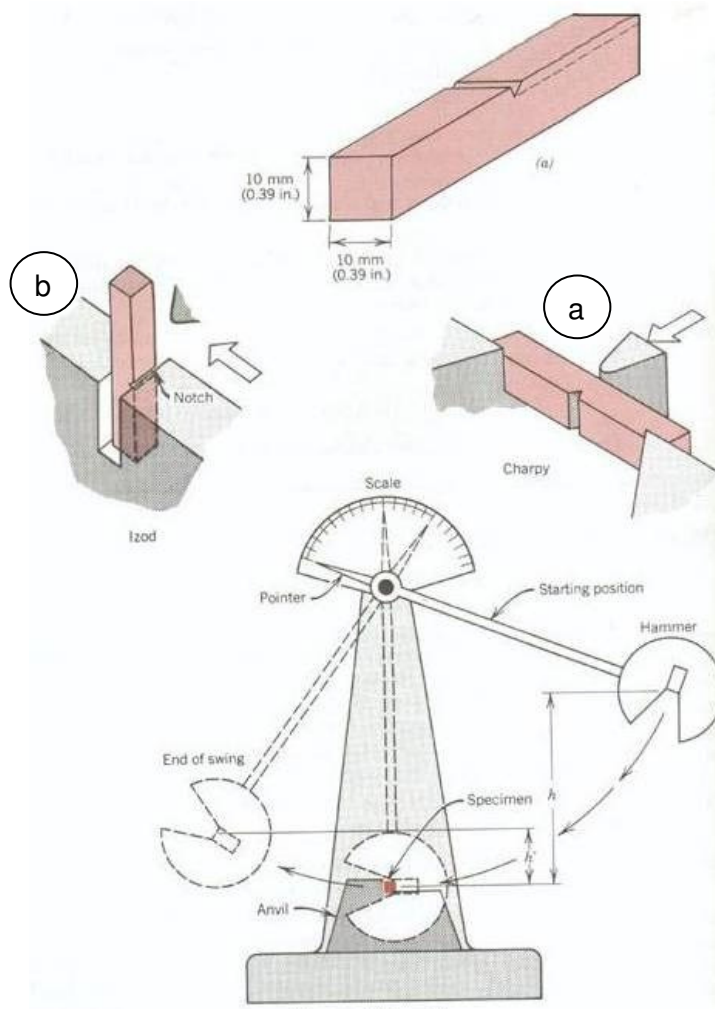


Figura 2.2.7.- Configuración y instrumentación para un ensayo Charpy (a) e Izod (b).

- Torre de caída de peso: en este caso una masa acelerada por la acción de la gravedad impacta contra una probeta (normalmente en configuración Charpy o Izod). Los datos se registran en un ordenador acondicionando previamente la señal, el desplazamiento de la probeta se obtiene mediante integración de la fuerza de contacto.

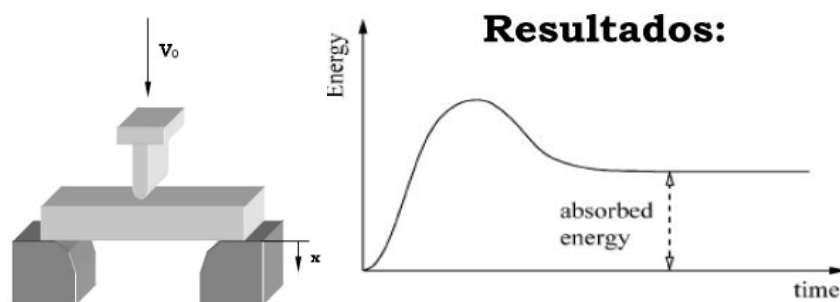


Figura 2.2.8.- Izquierda: Posible configuración de ensayo. Derecha: Representación gráfica de los resultados analizados por el ordenador.

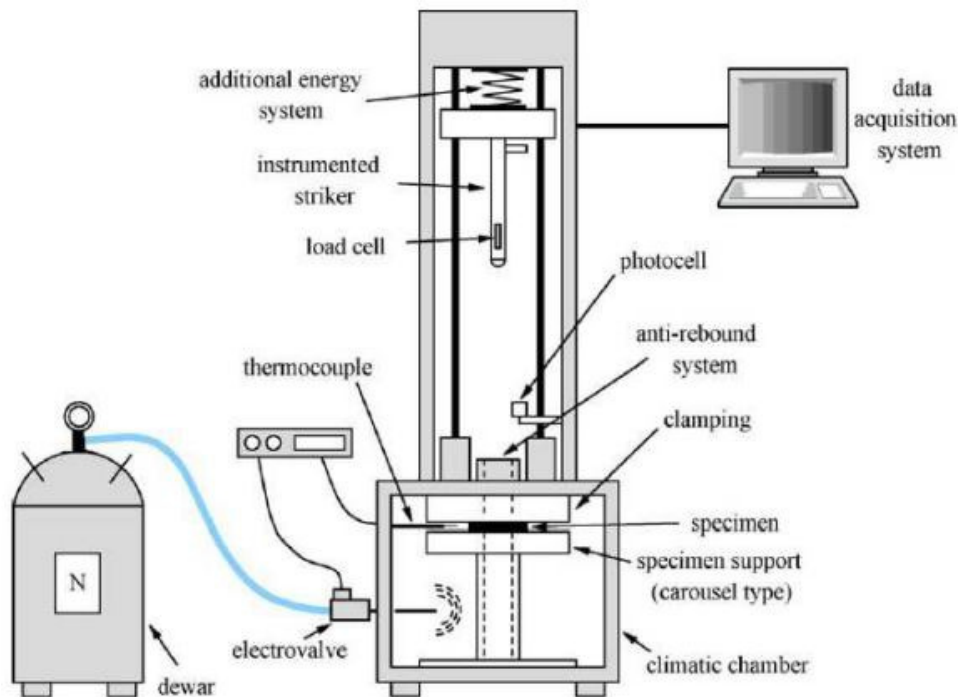


Figura 2.2.9.- Esquema de la instrumentación para ensayos con torre de caída de peso.

- Máquina de tracción dinámica: consiste en una máquina que dispone de dos pistones que son acelerados hasta una velocidad de entre 10 y 15 m/s, mientras al mismo tiempo traccionan la probeta. Es un ensayo relativamente problemático debido a la dificultad de agarre de las probetas, ya que estas no se pueden empotrar, pues se correría el riesgo de sobrecargar los pistones, y se sujetan mediante unas pinzas.



Figura 2.2.10.- Equipo instrumentado para ensayos de máquina de tracción dinámica.

- Ensayos mediante barra Hopkinson: La barra Hopkinson consiste en un sistema compuesto por dos barras, la barra incidente y barra de transmisión, de manera que se produce una percusión en un extremo de la barra incidente que origina una carga impulsiva de impacto. Así pues, esta carga impulsiva recorre la barra incidente, parte de ella se refleja al llegar al extremo opuesto y la otra parte pasa a través de la probeta del material a ensayar hasta la barra de transmisión. Mediante el empleo de galgas extensiométricas se determinan las amplitudes y magnitudes de los impulsos generados. Existen diversos tipos de ensayo mediante la barra Hopkinson como de tracción, compresión o flexión, ello depende de la geometría y de la disposición de la probeta. Uno de los mayores problemas que supone este tipo de ensayos es la dificultad de interpretación de datos debido a elevada densidad de ruido que se provoca con la generación de la carga impulsiva.

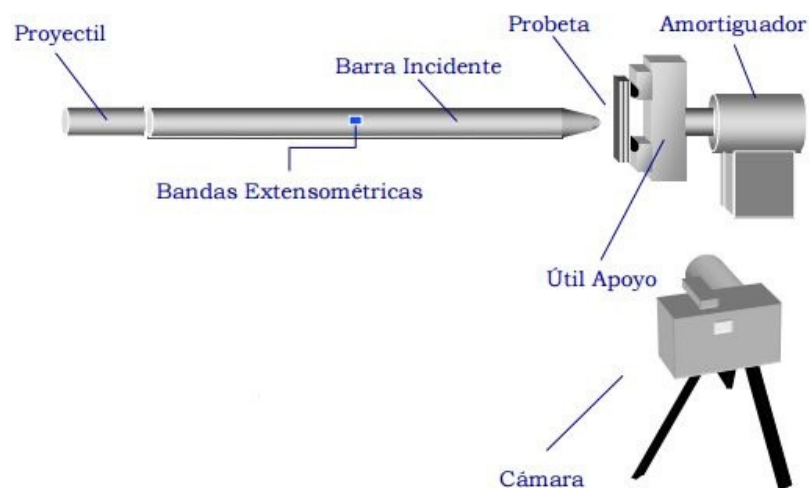


Figura 2.2.11.- Esquema de un ensayo a flexión mediante una barra Hopkinson.

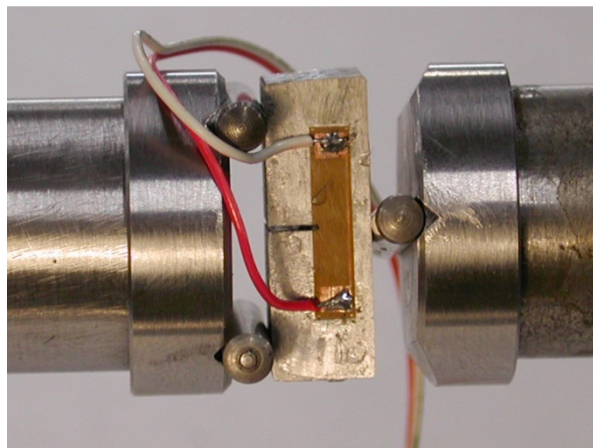


Figura 2.2.12.- Detalle de la disposición de la probeta de ensayo y el instrumentado utilizado en un ensayo de flexión mediante una barra Hopkinson.

- Cañón de gas: consiste en un sistema de proyectil-blanco en el que el proyectil es impulsado mediante un cañón de gas. Normalmente se utiliza un gas diferente al aire debido a los problemas de onda de choque que se producen en el cañón al sobrepasar la velocidad del sonido. Se emplean esencialmente dos reglas de estudio y diseño en probetas para blindajes: la penetración y el límite balístico (velocidad mínima necesaria para atravesar una probeta o blindaje). Se requiere una instrumentación de unas características técnicas bastante altas como medidores y cámaras de alta velocidad, lo que le convierte en un ensayo de costes muy elevados.

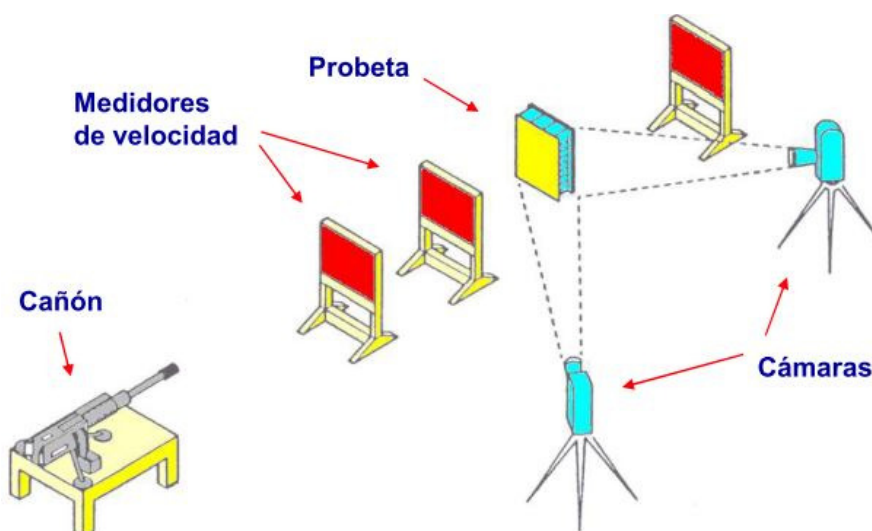


Figura 2.2.13.- Esquema de la disposición de un ensayo de impacto con cañón de gas.

Se presenta en la Tabla 2.2.2. el comportamiento del material en función de la velocidad de impacto del proyectil para ensayos de cañón de gas:

Velocidad de impacto (m/s)	Comportamiento del material
50	Fundamentalmente elástico, plasticidad local
50-500	Fundamentalmente plástico
500-1000	Viscoplástico, la resistencia todavía es relevante
1000-3000	Fluido, la densidad es el parámetro relevante
3000-12000	Hidrodinámico / Cambio de fase
>12000	Evaporación

Tabla 2.2.2.- Comportamiento de los materiales en función de la velocidad del proyectil.

2.2.2.3.- Ensayo de fractura

En las estructuras existen defectos o fisuras que pueden crecer durante su vida en servicio. Por ello, se hace imprescindible caracterizar mecánicamente el comportamiento de los materiales en presencia de fisuras. Puesto que estos se comportan de manera muy distintas a aquellos libres de defectos, es necesario el desarrollo de un método de cálculo de *Mecánica de la Fractura* (Lamo Arango y Zahr Viñuela 2014). Para este tipo de ensayos se emplean distintas geometrías y disposiciones de probeta, pero suelen seguirse las mismas fases:

1. Prefisuración por fatiga.
2. Ensayo de rotura.
3. Medición de longitud de fisura.
4. Cálculo de los parámetros que caracterizan el material.

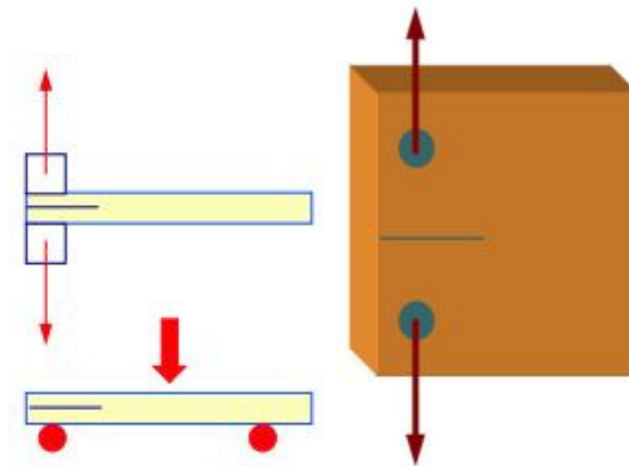


Figura 2.2.14.- Ejemplos de distintas disposiciones y geometrías de probeta para un ensayo de fractura.

2.3.- Diseño de blindajes ligeros

2.3.1.- Penetración y límite balístico

En el punto anterior se ha comentado que a la hora de caracterizar un material mediante un proceso de impacto de proyectil se suelen emplear en el diseño los términos de *penetración* y *límite balístico*.

De esta manera es conveniente establecer un criterio que evalúe el modelo de blindaje que se está diseñando. Puesto que el propósito principal de estos estudios es determinar el espesor de un determinado blindaje, habrá que imponer un criterio que diferencie entre penetración (entrada del proyectil en el objetivo sin perforarlo) o perforación completa. Generalmente se distinguen tres criterios principales (Zukas et al. 1982), expuestos a continuación:

- Criterio del ejército (*Army*): cuando existe paso de luz a través del orificio producido por un proyectil al alcanzar la superficie trasera del blanco, consideramos que existe perforación completa, siendo este el más conservador de los tres criterios propuestos (Figura 2.3.1.).
- Criterio de protección: existe perforación completa cuando se traspasa una hoja testigo de aluminio que se separa de la cara trasera del blanco 6 pulgadas (152.4 mm) (Figura 2.3.1.).
- Criterio de la marina (*Navy*): no habrá perforación completa si al menos la mitad del proyectil no atraviesa el material objetivo (Figura 2.3.1.).

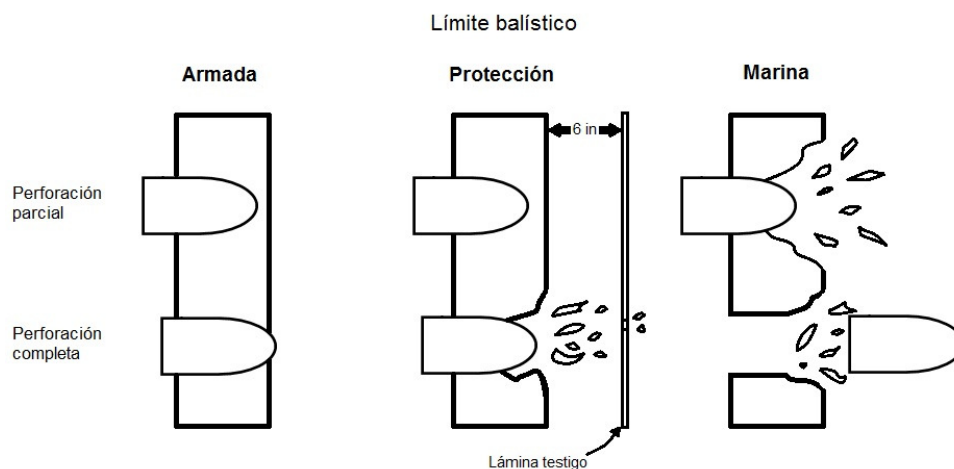


Figura 2.3.1.- Criterios de penetración y perforación completa según Zukas et al. 1982.

Habiendo definido un criterio de perforación completa el siguiente paso con el que se topa el diseñador del blindaje es para qué velocidad mínima existirá dicha perforación, es decir, por debajo de qué velocidad el proyectil no perforará el objetivo. Esta velocidad se conoce comúnmente como *límite balístico*, para determinarlo se puede acudir al uso común de dos técnicas (Zukas et al. 1982):

- Deterministas: aplicando el método determinista resolveremos una serie de ecuaciones, que expresan los principios físicos durante el impacto (leyes de conservación y relaciones constitutivas de los materiales), para averiguar el valor del límite balístico.
- Probabilista: para hacer uso del procedimiento probabilístico se realiza una secuencia de ensayos que se representarán en una curva de probabilidad de perforación (Figura 2.3.2.) de un sistema proyectil-objetivo. De esta manera se podrá predecir el porcentaje de probabilidad de penetración en función de la velocidad del impacto.

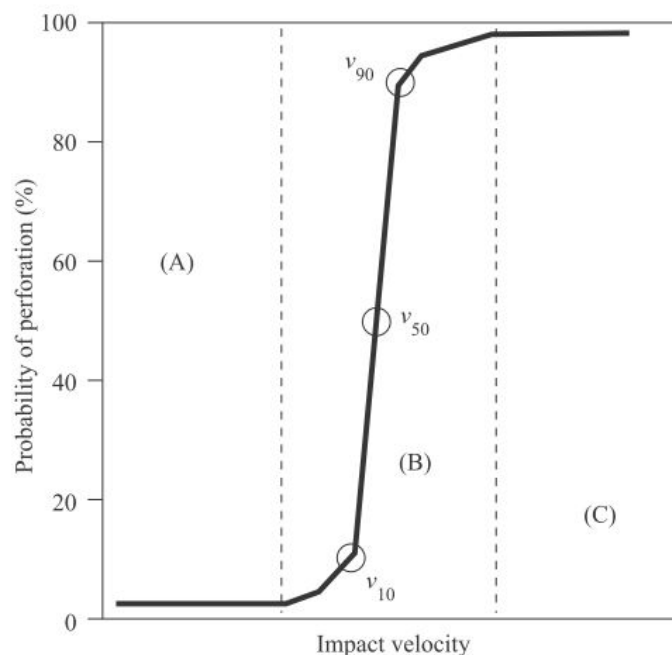


Figura 2.3.2.- Curva probabilidad de penetración para un sistema proyectil-objetivo genérico.

2.3.2.- Herramientas de diseño de blindajes

El diseño de los actuales blindajes ligeros cerámico-metálicos constituye un estudio de elevada complejidad (Wilson et al. 1995), para el cual tradicionalmente se han seguido tres métodos o aproximaciones de cálculo:

- Método empírico
- Modelización numérica
- Modelización analítica

2.3.2.1.- Método empírico

El método experimental (método probabilista como se ha visto en el apartado 2.3.1.) es el más ampliamente utilizado debido a la complejidad de análisis que este tipo de problemas ofrece. Proporciona la máxima precisión en comparación con el resto de métodos, pero tiene la desventaja de ser exclusivamente válido para el sistema singular utilizado de proyectil-objetivo. Asimismo es un método muy costoso (el más costoso de los tres) pues requiere instalaciones (galerías de tiro) y equipos (cañones de pólvora o de gas, cámaras de alta velocidad, cámaras de radiografía ultrarrápida, etc.) poco asequibles, además del propio coste de mantenimiento. Las técnicas semiempíricas se suelen desarrollar en paralelo a fin de validar los ensayos de disparo reales para otras configuraciones de proyectil-objetivo, mediante la unión de resultados experimentales y su extrapolación a otros sistemas (Fernández Fdz. Et al. 2008).

2.3.2.2.- Modelización numérica

La necesidad de diseñar herramientas como alternativa o complemento a los ensayos experimentales ha dado pie al desarrollo de diferentes métodos de simulación. De esta manera, el uso de ensayos de fuego ha sido relevado a la fase final del diseño. Los modelos numéricos proporcionan una solución completa del proceso de penetración mediante la resolución de todo el conjunto de ecuaciones diferenciales de la termomecánica en medios continuos, obteniendo resultados bastante fiables. La amplia información proporcionada por códigos de elementos finitos o diferencias finitas permite un entendimiento mejor del proceso y es bastante valioso para mejorar el diseño de las armaduras. Independientemente, para ser capaz de

utilizar estos códigos e interpretar sus resultados, el investigador ha de tener un alto nivel de preparación y práctica. Las grandes cantidades de tiempo requeridas para el cálculo de una sola simulación es otra de las limitaciones de este método como herramienta de diseño de armaduras. Además de estas limitaciones técnicas, existen una serie de errores de aproximación. Los mayores errores de aproximación en los métodos numéricos no vienen dados por los propios errores relativos al método en sí, sino que dependen principalmente de las ecuaciones constitutivas elegidas para los materiales, puesto que los procesos físicos provocados durante el impacto (grandes incrementos de energía, altas velocidades de deformación, elevadas temperaturas, etc.) necesitan una serie de ecuaciones bastante precisas y en la mayoría de los casos desconocidas. En el caso de los metales existe existen numerosas publicaciones de modelos (Steinberg et al. 1980, Johnson et al. 1983, Zerilli et al. 1987) para estas ecuaciones constitutivas y de estado en las condiciones de carga indicadas. Por el contrario, en los materiales cerámicos estos modelos han tenido un desarrollo escaso hasta las últimas décadas, si bien existe una serie de modelos propuestos que proporcionan resultados bastante fieles al comportamiento real del material (Drucker y Prager 1952, Cortés et al. 1992, Curran et al. 1993, Johnson y Holmquist 1994).

2.3.2.3.- Modelización analítica

La tercera aproximación es el desarrollo de modelos analíticos simplificados que representen el proceso de impacto mediante ecuaciones directas, asumiendo ciertas hipótesis que compendian los mecanismos reales del proceso de penetración. La descripción del material se simplifica utilizando una serie de parámetros de los materiales que se obtienen de manera sencilla experimentalmente. La ventaja principal de esta aproximación es que proporciona la solución de un sistema proyectil-objetivo definido en pocos segundos con un ordenador personal. Rápido y fácil de utilizar, este sistema permite la simulación de un gran número de problemas de impacto en las primeras fases del diseño, limitando de esta manera la cantidad de materiales y los espesores a considerar. Esto ahorra de manera sustancial tiempo y dinero. Como desventaja tenemos la falta de precisión de estos modelos en comparación con una simulación numérica completa. También las severas hipótesis consideradas para su desarrollo hacen que tengan una versatilidad muy limitada de estas herramientas de simulación, cada modelo tiene un alcance de aplicación específico. Por lo tanto el ingeniero que está diseñando necesita una herramienta barata que no solo le permite resolver el problema de impacto en el mínimo tiempo posible, sino que también es de

fácil uso y proporciona la precisión requerida para un rango de configuraciones proyectil-objetivo muy amplio. Estas características son de especial interés en las fases iniciales del diseño.

2.4.- Comportamiento de blindajes de cerámica-metal bajo cargas impulsivas

El estudio del comportamiento de los materiales cerámicos ha madurado únicamente en las últimas tres décadas, ya que su fragilidad y la imposibilidad de analizar resultados intermedios en un ensayo hacen que este estudio sea especialmente complicado para obtener resultados fiables. Los primeros estudios de observación de impactos sobre blancos cerámicos fueron desarrollados por Wilkins (1978).

El proceso de penetración en un blindaje ligero cerámico/metal se divide en diferentes etapas (Figura 2.4.1). En primera instancia, se observa que al impactar el proyectil sobre la cerámica intacta se genera una onda de choque, inicialmente de valores de presión muy elevados que finalmente se ven atenuados hasta alcanzar valores inferiores al límite elástico de Hugoniot (LEH) del material cerámico. Dicha onda de choque genera un frente de fisuración que se propaga en la dirección del impacto. Este frente desencadena la aparición de fisuras, denominadas por diversos autores como fisuras *circunferenciales*, *cónicas* y *laterales* (Shockey et al. 1990, Riou et al. 1994). Tanto las fisuras circunferenciales como las cónicas se originan por la aparición de esfuerzos de tracción que fisuran el material desde la zona de contacto entre proyectil y blanco. Puesto que la máxima tensión a tracción se produce en dirección radial, estas fisuras tendrán una forma anular y concéntrica al contorno del proyectil, propagándose con un ángulo de entre 60 y 75° respecto al eje del impacto (Shockey et al. 1990, Bless et al. 1987); el valor de este ángulo varía según las características del problema planteado. Las fisuras laterales se deben a la reflexión de la onda de choque sobre la cara anterior de la placa cerámica, aparecen más alejadas de la zona de contacto y más cercanas a la superficie de la placa. En esta primera etapa apenas se transmite carga a la placa metálica posterior ya que es aquí cuando la cerámica presenta su mayor resistencia frente a la penetración (Figura 2.4.2 (a)).

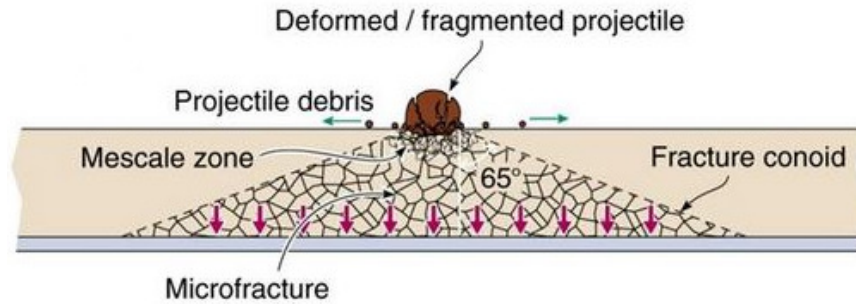


Figura 2.4.1.- Esquema del proceso de fragmentación y formación de la zona Mescal (University of Virginia - Wadley Research Group).

Tras el primer instante de contacto una fracción de la loseta ha superado su resistencia a compresión y comienzan a formarse varias zonas de cerámica pulverizada, de mayor a menor grado de pulverización, que rodean la cabeza del proyectil hasta una zona en la que la cerámica aún sigue intacta. Esta zona de cerámica pulverizada en la interfase entre proyectil-cerámica, también llamada *zona Mescal*, provoca una enorme erosión sobre el primero al verse obligada a fluir alrededor de él. Inmediatamente después se puede observar cómo la placa cerámica se fragmenta hasta pulverizarse siguiendo la forma de un tronco de cono (debido a las fisuras comentadas anteriormente). Seguidamente el proyectil penetra la placa cerámica a través de esa zona pulverizada repartiendo, con un mayor área de contacto que la cabeza del proyectil, la presión impulsiva sobre la placa metálica, de tal manera que esta empieza a deformarse (Figura 2.4.2 (b)).

La duración del proceso de formación del tronco de cono cerámico (t_1) se establece según varios autores (Senf et al. 1994, Strassburger et al. 1994) como una relación entre el espesor de la loseta cerámica (h_c), la velocidad de las ondas elásticas del propio material cerámico (u_{long}) y la velocidad de propagación de las fisuras (v_c), recogida en la siguiente expresión:

$$t_1 = \frac{h_c}{u_{long}} + \frac{h_c}{v_c}$$

En el momento en el que el proyectil alcanza la placa metálica posterior se inicia un proceso de penetración metal-metal, más intuitivo que el cerámico-metal. Se producirá una penetración deformando plásticamente la placa hasta perforarla por completo, si el proyectil logra vencer dicha fuerza de plastificación, la fuerza para mover la placa y la fuerza de rozamiento entre el proyectil y la placa. Cabe mencionar que el proyectil

sufrirá también deformación plástica, aunque mucho menor que la de la placa debido a las características mecánicas del material del núcleo (Figura 2.4.2 (c)).

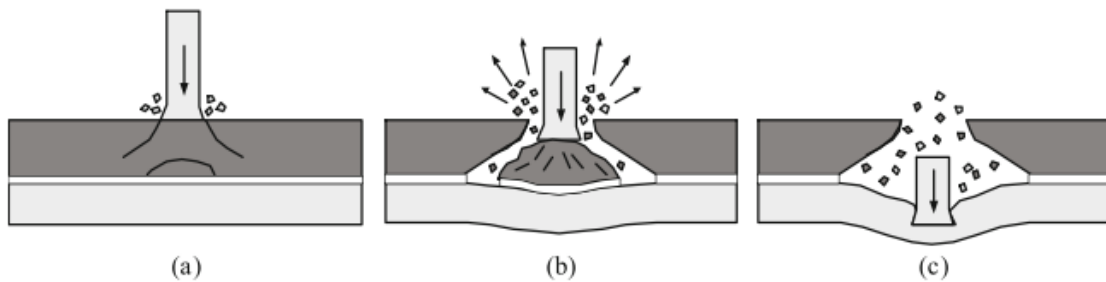


Figura 2.4.2.- Esquema del proceso de perforación de un blindaje cerámico/metálico. (a) Fragmentación, (b) penetración en la placa cerámica, (c) penetración en la placa posterior metálica (Serge Abrate 2011).

Además, para velocidades del proyectil muy superiores al límite balístico se produce una perforación, sin apenas resistencia de la placa, en la que el proyectil arranca a su paso un pedazo de la placa metálica, también llamado “tapón” metálico (Figura 2.4.3 (c)). Por otro lado, si las velocidades son más reducidas, la placa frenará el proyectil adquiriendo la misma velocidad que este y se producirá una perforación cuando la deformación radial alcanza un valor límite (Arias Hernández, A. (2002)).

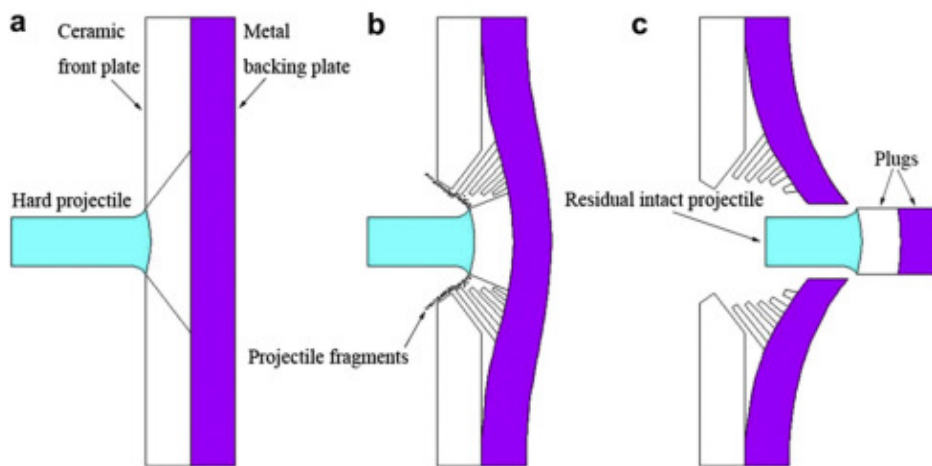


Figura 2.4.3.- Proceso de penetración a altas velocidades de impacto y formación del “tapón” metálico en un blindaje de cerámica/metal (R. Chi et al. 2013).

CAPÍTULO 3: MODELO NUMÉRICO

3.1.- Introducción a la modelización numérica

Este capítulo basa su estructura en la descripción del modelo numérico desarrollado en el presente trabajo. En dicho modelo se determina una simulación a alta velocidad de un impacto sobre varios blindajes de doble capa cerámica/metálica mediante en código comercial explícito Abaqus.

Se ha tratado de optimizar al máximo el modelo para que con la menor cantidad de tiempo posible se obtengan los resultados más próximos a la realidad. No solo se optimiza el número de elementos necesario para esta empresa, la búsqueda de los parámetros adecuados para modelizar cada material supone una de las dificultades más grandes. Puesto que cualquier cambio en dichos valores supone un cambio global en la estructura del problema, lo que termina mostrándose en diferencias acusadas del comportamiento de los materiales frente al real.

Los datos empleados para la validación numérica han sido los obtenidos experimentalmente por Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela en 2009.

3.2.- Hipótesis del modelo numérico

3.2.1.- Caracterización de los materiales

Uno de los principales obstáculos a los que se ha de enfrentar un diseñador de blindajes, al utilizar la simulación numérica, es el pobre conocimiento del comportamiento mecánico de los materiales con los que se está trabajando, fundamentalmente los criterios de fallo o rotura. Los resultados más precisos se encuentran en materiales metálicos, los cuales debido a su predecible comportamiento tienen una caracterización más sencilla que los cerámicos. Estos últimos se caracterizan comúnmente mediante una descripción fenomenológica.

3.2.1.1.- Materiales cerámicos

Los códigos de simulación numérica utilizados en problemas de impacto basan su cálculo en la integración de ecuaciones de conservación (masa, momento y energía) mediante métodos de elementos finitos o de diferencias finitas, según el programa utilizado. De esta manera es preciso introducir una serie de ecuaciones que presenten una relación entre las tensiones y las deformaciones que sufre el material y asimismo exponer un criterio de plasticidad y fallo. Habitualmente, para facilitar las relaciones entre las complejas ecuaciones, se dividen los tensores de tensiones y deformaciones en dos partes, una volumétrica o hidrostática y otra desviadora. De esta manera se relacionan las partes volumétricas entre sí mediante una ecuación de estado (EOS), en tanto que los elementos desviadores se relacionan mediante una ecuación constitutiva (Zaera 1997).

Existen diversos modelos de caracterización de materiales cerámicos (veáanse los propuestos por: Drucker y Prager 1952, Cortés et al. 1992, Johnson y Holmquist 1992 Curran et al. 1993, Johnson y Holmquist 1994). A pesar del interés que supondría analizar cada uno de ellos por separado, en el presente trabajo sólo se hará un breve comentario del modelo empleado en la simulación que a continuación se describe, el modelo de Johnson y Holmquist 1994. A pesar de no estar implementado en las opciones de propiedades materiales, el modelo Johnson-Holmquist es uno de los que mejor se adapta para materiales cerámicos en problemas de simulación numérica de impactos balísticos.

Modelo de Johnson y Holmquist (1994)

En mecánica de sólidos el modelo de daño de Johnson-Holmquist se usa para modelar el comportamiento mecánico de daño de materiales frágiles, como cerámicas, rocas y hormigones, bajo diferentes velocidades de deformación. Dichos materiales normalmente tienen un alto límite de esfuerzo compresivo pero el límite es bajo para esfuerzos de tracción. Además tienden a dañarse progresivamente bajo cargas debido al crecimiento de microfracturas. Los modelos de Johnson-Holmquist, tanto el primero de 1992 (JH-1) como el segundo de 1994 (JH-2), se desarrollaron con el objetivo de facilitar simulaciones numéricas de blindajes con materiales cerámicos bajo cargas impulsivas o balísticas.

El modelo de Johnson y Holmquist supone que el daño sufrido por el material es acumulativo, así pues el límite elástico depende de el valor de un parámetro incremental “D” que oscila entre cero y uno, para el material intacto y completamente

dañado respectivamente. De esta manera, se puede expresar el límite elástico de forma adimensional mediante la siguiente expresión:

$$\sigma' = \sigma'_i + D(\sigma'_i - \sigma'_f)$$

donde σ'_i es el límite elástico para el material íntegro y σ'_f para el material pulverizado, ambos adimensionalizados. Dicha adimensionalización se resuelve conociendo el valor del límite elástico de Hugoniot (σ_{HEL}):

$$\sigma' = \frac{\sigma}{\sigma_{HEL}} \quad \sigma'_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{HEL}} \quad \sigma'_f = \frac{\sigma_f}{\sigma_{HEL}}$$

El valor del parámetro de daño “D” depende del incremento de deformación plástica del material ($\Delta\varepsilon_p$):

$$D = \frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}$$

donde ε_p^f es la deformación plástica para el material dañado y depende del valor de la presión “P” -de igual manera que se ha realizado anteriormente, el valor P' se adimensionaliza con el valor de la presión para el límite de Hugoniot (P_{HEL})- y de “T” -límite hidrodinámico a tracción del material o presión negativa máxima que el material puede resistir-, así como de las constantes d_1 y d_2 características del material:

$$\varepsilon_p^f = d_1(P' + T')^{d_2}$$

Además ambos límites elásticos, para el material intacto y para el dañado, dependen del valor de la presión “P” y de una serie de parámetros adimensionales propios de cada material (A,N, B, M):

$$P' = \frac{P}{P_{HEL}}$$

$$\sigma'_i = A(P' + T')^N \quad \sigma'_f = B(P')^M$$

Para una presión inferior a este valor, la porción intacta del material no aporta resistencia alguna. La porción dañada dejará de presentar resistencia cuando la presión pase a ser de tracción:

$$\sigma'_i = 0 \quad \text{para } P < -T'$$

$$\sigma'_f = 0 \quad \text{para } P < 0$$

Todas las ecuaciones comentadas anteriormente se recogen en la Figura 3.2.1, así como las gráficas de este modelo para un material cerámico genérico.

Generalmente los modelos propuestos para materiales metálicos constan de una serie de ecuaciones constitutivas que consideran efectos como el endurecimiento por deformación, el ablandamiento térmico o el aumento del límite elástico con la velocidad de deformación (Steinberg et al. 1980, Johnson y Cook 1983).

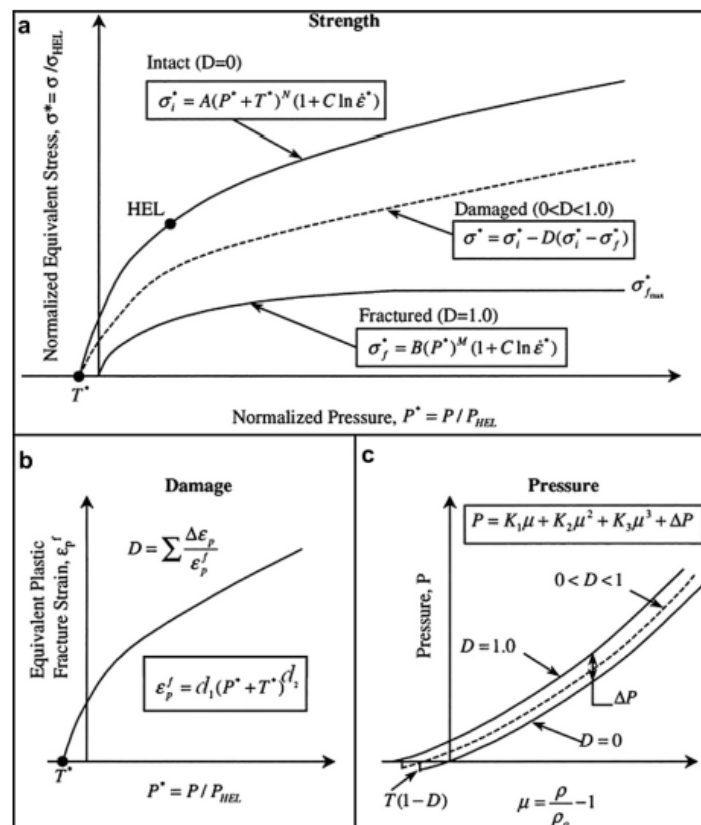


Figura 3.2.1.- Modelo Johnson-Holmquist (JH-2) en el cual: (a) modelo de resistencia, (b) modelo de daño y (c) modelo de presión (Johnson y Holmquist, 1994).

3.2.1.2.- Materiales metálicos

Modelo de Johnson y Cook (1983)

El modelo de Johnson-Cook es una particularidad del modelo de plasticidad de Von Mises, con ecuaciones analíticas de leyes de endurecimiento y ratios de dependencia. Es apto para una amplia gama de tensiones-deformaciones de muchos materiales, en especial para metales. Además se puede emplear simultáneamente con el modelo de fallo de Johnson-Cook (1985) (Abaqus Documentation). Además de las cualidades

formuladas, el modelo de plasticidad de Johnson-Cook está definido en el código Abaqus, haciendo más sencilla su implementación.

Para la simulación realizada se ha empleado dicha ley de endurecimiento/ablandamiento de Johnson-Cook, en la que se tiene en cuenta el comportamiento del material en función de la velocidad de deformación así como el ablandamiento térmico, ambos muy característicos en este tipo de procesos. Se trata de un modelo fenomenológico, comúnmente empleado en metales, utilizado en especial en estudios de balística.

La ley de tensión viene expresada en función de la deformación, la velocidad de deformación y la temperatura mediante la siguiente expresión (Johnson-Cook 1983):

$$\sigma = [A' + B'(\varepsilon_p)^n] \left[1 + C' \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{t - t_0}{t_m - t_0} \right)^m \right]$$

- donde:
- A' es el límite elástico inicial
 - B' es el coeficiente de endurecimiento por deformación
 - ε_p es la deformación plástica efectiva
 - n es el coeficiente de endurecimiento por deformación
 - $\dot{\varepsilon}$ es la velocidad de deformación plástica efectiva
 - $\dot{\varepsilon}_0$ es la velocidad de deformación de referencia
 - C' es el coeficiente de velocidad de deformación
 - m es el coeficiente de ablandamiento por temperatura
 - t es la temperatura
 - t_0 es la temperatura ambiente
 - t_m es la temperatura de fusión

El modelo de fractura de Johnson-Cook (1985), disponible también en Abaqus, viene definido por la expresión:

$$D = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p^f}$$

donde D es el parámetro de daño y ε_p^f es la deformación de fractura, que viene expresada mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_p^f = \left[d'_1 + d'_2 \exp\left(d'_3 \frac{\sigma_m}{\sigma}\right) \right] \left[1 + d'_4 \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \left[1 + d'_5 \left(\frac{t - t_0}{t_m - t_0}\right) \right]$$

donde - $d'_1, d'_2, d'_3, d'_4, d'_5$ son constantes de daño

- σ_m es la tensión hidrostática

- σ es la tensión equivalente

3.3.- Modelización del impacto

En el presente trabajo se pretende validar numéricamente un ensayo de impacto que consta de un blindaje de cerámica-metal (alúmina-aluminio) y un proyectil de núcleo duro (tungsteno) en distintas configuraciones de espesor, tanto del material cerámico como del metálico, con el código comercial explícito de elementos finitos, Abaqus. Se proponen tres materiales principales en el estudio: la placa anterior cerámica del blindaje es alúmina 99.5%, la placa posterior metálica es una aleación de aluminio (AL 5083-H116) y por último el núcleo duro del proyectil compuesto de una aleación de tungsteno.

Las configuraciones del blindaje (donde T_c y T_m son los espesores de la placa cerámica y de la placa metálica respectivamente) en las que se ha centrado este estudio se reflejan en la Tabla 3.3.1, así como los resultados experimentales de velocidad residual ($V_{res.}$) y longitud residual del proyectil ($L_{res.}$) obtenidos por Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela (1998). Se pretende verificar los resultados simulados comparándolos con los datos expuestos experimentalmente. De esta manera se podrá utilizar el modelo para obtener otros datos de interés como el límite balístico para cada configuración de espesor, la velocidad residual en cada caso (siempre que exista penetración), etc.

El código Abaqus está dividido en diferentes módulos a través de los cuales se diseña el problema deseado. Desde la configuración, pasando por los materiales, las condiciones del problema, el tiempo de cálculo, etc. A continuación se expone un resumen del problema diseñado, dividiéndolo según los módulos comentados.

<i>Nº. test</i>	<i>T_c (mm)</i>	<i>T_m (mm)</i>	<i>V_{res.} (m/s)</i>	<i>L_{res.} (mm)</i>
1	20	10	930	22
2	20	15	930-960	24-27
3	25	10	960	25
4	25	15	939	24

Tabla 3.3.1.- Configuración de espesores y resultados experimentales de un blindaje cerámico-metal con un proyectil tipo APDS de 20 mm (Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela 2009).

3.3.1.- Geometría del ensayo

La configuración geométrica del ensayo se efectúa con el módulo *Part*. Realizando un croquis de la pieza deseada se puede trabajar con ella en 2D o 3D, de manera similar a los códigos CAD (*Computer-Aided Design*). De esta manera se ha conseguido en 3D, mediante revolución, todas las partes necesarias en nuestro caso. Además, se advierte que las piezas están cortadas a un cuarto de su forma real. Puesto que todas las partes a modelar son de revolución, se han decidido aplicar dos planos de simetría junto con la imposición de una serie de condiciones de contorno. Se exponen a continuación las tres partes del modelo con sus respectivas características geométricas:

Proyectil

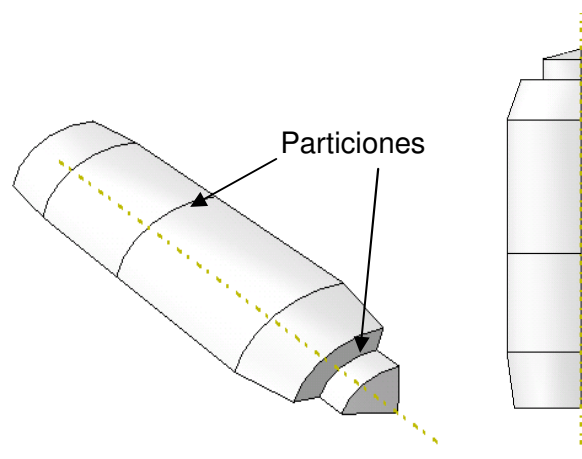


Figura 3.3.1.- Vista en perspectiva (izquierda) y en 2D (derecha) del proyectil.

La munición es un proyectil de penetración de tipo APDS (armour-piercing discarding sabot) de 20 mm (sub-calibrado). Las dimensiones se aproximan a un cilindro de 12 mm de diámetro y 35.2 mm de largo y un peso de 72 g. En la Figura 3.3.1 se observa el modelo de proyectil empleado en la simulación y en la Figura 3.3.2 se presenta una comparación con el proyectil real. Cabe comentar que se le han realizado dos particiones al proyectil para facilitar a la herramienta de mallado del programa, una aproximadamente a la mitad del cuerpo y la otra bajo la cabeza puntiaguda (ver Figura 3.3.1).

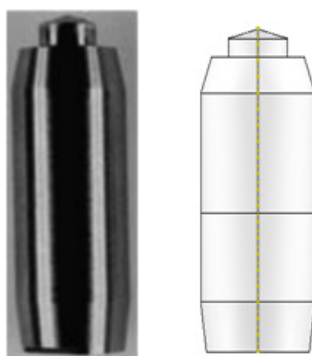


Figura 3.3.2.- Comparación entre un proyectil APDS-20 mm real (R. Chi et al. 2013) y el modelo empleado en este trabajo.

Placa cerámica

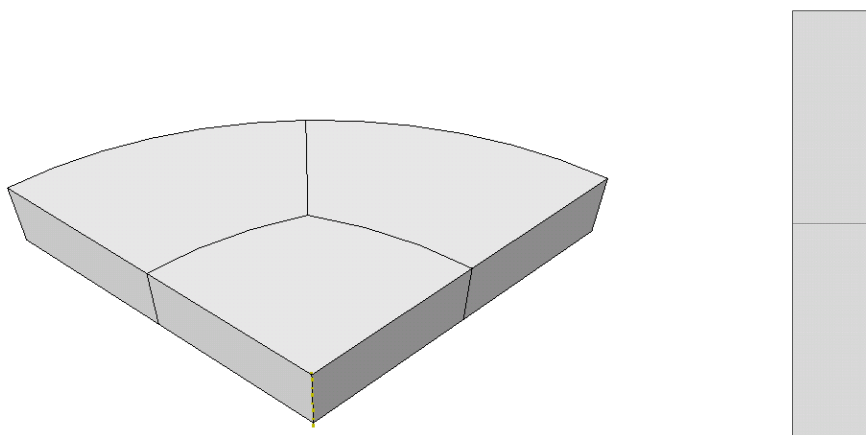


Figura 3.3.3.- Vista en perspectiva (izquierda) y en 2D (derecha) de la placa frontal cerámica.

Puesto que se han utilizado, como se ha comentado anteriormente, condiciones de axil-simetría, se han modelado ambas placas como discos de 100 y 125 mm de radio. Asegurándonos de esta manera que la proporción entre espesor y diámetro sea siempre mayor o igual a diez, para que no se produzcan fallos de cálculo o resultados poco fiables. Al igual que con el proyectil, se han realizado particiones en la placa, en

este caso para que los elementos de la zona central de la malla se aproximen lo máximo posible a un cubo. Además en la zona de unión de ambas curvas se ha añadido una recta de partición para que no hubiera problemas de mallado en dicha zona. Se observa en la Figura 3.3.5 un croquis con las medidas de las particiones empleadas en ambas placas.

Placa metálica

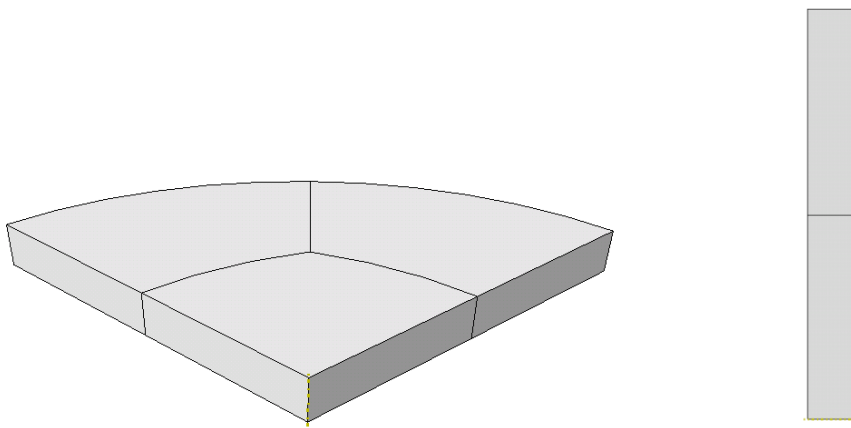


Figura 3.3.4.- Vista en perspectiva (izquierda) y en 2D (derecha) de la placa posterior metálica.

La geometría escogida para la placa metálica cumple las mismas características comentadas anteriormente en la placa cerámica.

Para percibir de mejor manera las dimensiones de las particiones realizadas se ha añadido el croquis de dichas particiones (Figura 3.3.5).

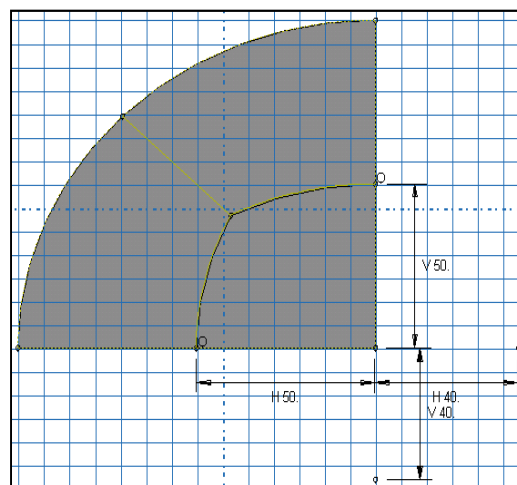


Figura 3.3.5.- Croquis con las dimensiones de las particiones realizadas en las placas.

3.3.2.- Propiedades de los materiales

Proyectil

El proyectil está compuesto por un núcleo duro de tungsteno y una nariz ojival de una aleación ligera de aluminio (Figura 3.3.6). Puesto que el núcleo posee más del 99% del peso total del proyectil se ha modelado únicamente este. El comportamiento del tungsteno se ha definido con el modelo de plastificación y de fractura de Johnson-Cook, ambos comentados anteriormente. Los valores necesarios para definir el material se recogen en la Tabla 3.3.2 (R. Chi 2013 y S. Feli y M. R. Asgari 2011).

Constantes	Unidades	Valores
Densidad, ρ_0	kg/m ³	17600
Módulo de Young, E	GPa	314
Coefficiente de Poisson, ν	GPa	0,29
Límite elástico estático, A'	GPa	1,506
Coefficiente de endurecimiento por deformación, B'	GPa	0,177
Exponente de endurecimiento por deformación, n	-	0,12
Coefficiente de velocidad de deformación, C'	-	0,016
Velocidad de deformación de referencia, $\dot{\epsilon}_0$	s ⁻¹	1,0
Exponente de ablandamiento térmico, m	-	1,0
Temperatura ambiente, t_0	K	300
Temperatura de fusión, t_m	K	1723
Constante de daño, d_1	-	0,05
Constante de daño, d_2	-	0,33
Constante de daño, d_3	-	-1,5
Constante de daño, d_4	-	0
Constante de daño, d_5	-	0

Tabla 3.3.2.- Constantes del tungsteno utilizadas en la simulación.



Figura 3.3.6.- **Proyectil APDS - 20 mm completo, incluyendo la nariz ojival.**

Placa cerámica

La placa cerámica está constituida por alúmina de un 99.5% de pureza. Para modelarla se ha utilizado el criterio de Johnson-Holmquist, descrito anteriormente. Este modelo de material no está incluido en el panel de propiedades materiales de Abaqus y se ha de añadir por el usuario en el archivo de datos “.inp” (Apéndice A), donde se encuentra toda la información del modelo y con el que trabaja el programa, generado en el módulo *Job*. En la Tabla 3.3.3 (R. Chi 2013, S. Feli y M. R. Asgari 2011 y D. S. Cronin 2003) se recogen las constantes necesarias para modelar la alúmina.

Constantes	Unidades	Valores
Densidad, ρ_0	kg/m ³	3890
Módulo de cortadura, G	GPa	152
Coeficiente de fuerza intacta, A	-	0,88
Exponente de fuerza intacta, N	-	0,64
Coeficiente de fuerza de fractura, B	-	0,28
Exponente de fuerza de fractura, M	-	0,6
Coeficiente de velocidad de deformación, C	s ⁻¹	0,007
Velocidad de deformación de referencia, $\dot{\epsilon}_0$	s ⁻¹	1,0
Tensión hidrostática máxima, T	MPa	262
Esfuerzo intacto normalizado máximo, σ_i^{max}	Mpa	12200
Esfuerzo de fractura normalizado máximo, σ_f^{max}	MPa	5000
Límite elástico de Hugoniot, HEL	MPa	8300
Presión en el HEL, p_{HEL}	MPa	1460
Factor de compresibilidad, β	-	1,0
Coeficiente de daño, d_1	-	0,01
Exponente de daño, d_2	-	0,7

Desplazamiento de fallo máximo, $\bar{\varepsilon}_{f,max}^{pl}$	-	10
Desplazamiento de fallo mínimo, $\bar{\varepsilon}_{f,min}^{pl}$	-	0
Criterio de fallo, FS	-	0,5
Tipo de daño, $IDamage$	-	0
Módulo de compresibilidad, K_1	GPa	231
Coefficiente de presión, K_2	GPa	-160
Coefficiente de presión, K_3	GPa	2774

Tabla 3.3.3.- Constantes de la alúmina utilizadas en la simulación.

Placa metálica

La placa metálica está constituida por un aleación de aluminio llamada AL 5083-H116, tanto el modelo de plastificación como el de fractura se han simulado con los criterios de Johnson-Holmquist. En la tabla 3.3.4 (R. Chi 2013 y Del Metal S.A.) se recogen los parámetros utilizados para reproducir el comportamiento del aluminio.

Constantes	Unidades	Valores
Densidad, ρ_0	kg/m ³	2700
Módulo de Young, E	GPa	71
Coefficiente de Poisson, ν	-	0,33
Límite elástico estático, A'	GPa	0,167
Coefficiente de endurecimiento por deformación, B'	GPa	0,596
Exponente de endurecimiento por deformación, n	-	0,551
Coefficiente de velocidad de deformación, C'	-	0,001
Velocidad de deformación de referencia, $\dot{\varepsilon}_0$	s ⁻¹	1,0
Exponente de ablandamiento térmico, m	-	0,859
Temperatura ambiente, t_0	K	300
Temperatura de fusión, t_m	K	900
Constante de daño, d_1	-	0,0261
Constante de daño, d_2	-	0,263
Constante de daño, d_3	-	-0,349
Constante de daño, d_4	-	0,247
Constante de daño, d_5	-	16,8

Tabla 3.3.4.- Constantes del aluminio (AL 5083-H116) utilizadas en la simulación.

3.3.3.- Ensamblado del conjunto

Una vez diseñadas las partes y aplicado las propiedades de los materiales a cada una de ellas, se debe realizar la configuración para simular el impacto en el módulo *Assembly*. En este trabajo, al haber empleado axilsimetría en todas las partes, el eje de revolución (y por extensión de simetría) de todas ellas será el centro del blanco, es decir, el proyectil se moverá en la dirección de dicho eje, que a su vez será el centro de las placas completas (Figura 3.3.7).

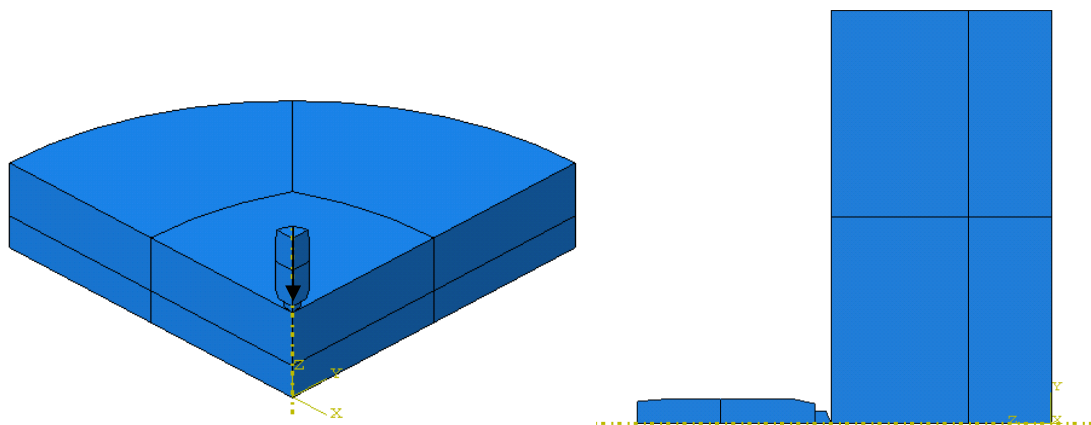


Figura 3.3.7.- Ensamblaje de la simulación para una placa cerámica de 25 mm y una placa metálica de 15 mm, en perspectiva a la derecha y en 2D a la izquierda (La línea discontinua marca el eje de revolución y la flecha la dirección del impacto).

3.3.4.- Interacciones

El siguiente módulo a comentar es el *Interaction*, en el que se definirá el comportamiento de cada parte, tanto con el resto de ellas como consigo misma. En esta simulación se han utilizado únicamente dos interacciones, una para definir el contacto entre las partes y la otra para especificar cómo están unidas las placas.

Para la primera se ha definido una interacción tipo contacto, sin darle ninguna otra especificación, es decir que el tipo de contacto utilizado es el predeterminado por Abaqus. Habiendo definido un contacto, el siguiente paso es hacer que las partes interaccionen de manera adecuada entre ellas y consigo mismas. Se ha optado por hacer un contacto por pares de superficies, en definitiva se trata de hacer que todas las superficies de la malla de cada parte interaccione con la del resto y consigo misma siempre que haya contacto entre ellas. Dicho esto, cabe mencionar que previamente

ha habido que mallar las partes y realizar una superficie de malla, es decir, cada cara de los elementos de la malla conforman la superficie de contacto total de una parte (Figura 3.3.8).

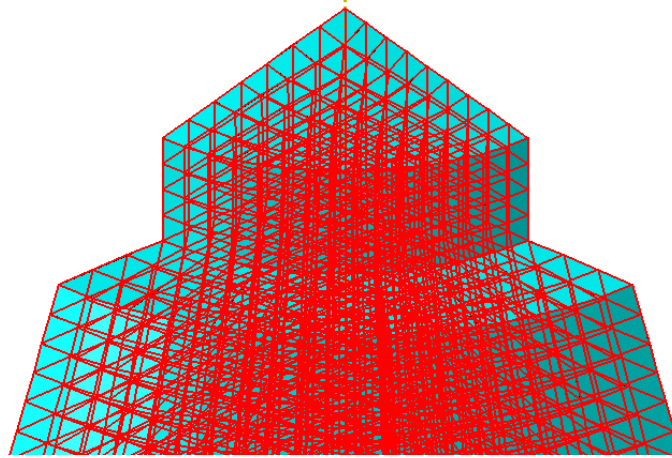


Figura 3.3.8.- Detalle de la cabeza del proyectil con las superficies de elemento de malla.

Se han incluido seis pares de superficies de contacto:

- Proyectil – Placa cerámica
- Proyectil – Placa metálica
- Placa cerámica – Placa metálica
- Proyectil – Proyectil
- Placa cerámica – Placa cerámica
- Placa metálica – Placa metálica

Para la segunda interacción se pretende aplicar una opción de unión entre las placas que no “contamine” la simulación con otros parámetros. Se ha decidido fijar ambas placas con una opción de unión simple de tipo *Tie* (Atado), que consiste en que las superficies escogidas se mantengan unidas hasta que separen debido al fallo de los elementos cercanos a la interfase, entre el material cerámico y metálico. Dicho fallo estará basado en el modelo de daño del material cerámico. En la Figura 3.3.9 se observa que las superficies escogidas han sido las dos caras interiores de las placas, en rojo la cara interior de la placa metálica y en rosa la cara interior de la placa cerámica.

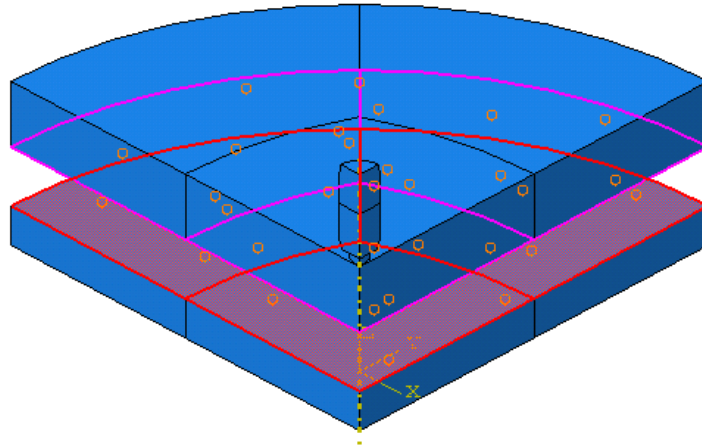


Figura 3.3.9.- Superficies escogidas para la unión tipo *Tie*, en rojo la cara interior metálica y en rosa la cara interior cerámica.

3.3.5.- Condiciones del problema

3.3.5.1.- Condiciones de contorno

Al hablar de las condiciones de contorno, lo primero en lo que debemos fijarnos es en que al tener simetrías, no solo se han de imponer las restricciones periféricas, si no que además se debe imponer una serie de condiciones para que se cumplan debidamente dichas simetrías. Las condiciones de contorno en el borde de las placas se tomarán como totalmente fijas, es decir, se impide todo tipo de desplazamiento para esa superficie (Figura 3.3.10). Las condiciones de contorno para las caras de plano de simetría consisten en impedir todo movimiento en dirección perpendicular a dichas caras. Esto es, que los elementos de las superficies de simetría se podrán mover a lo largo de dicha superficie pero no en otra dirección (Figura 3.3.10).

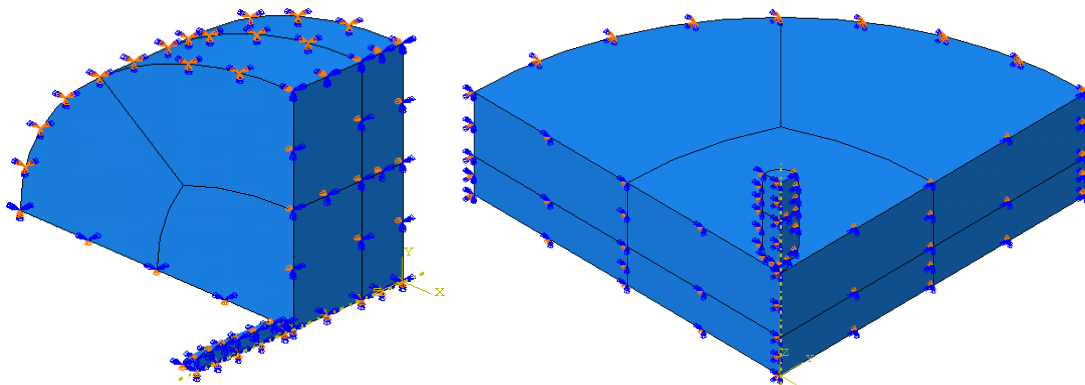


Figura 3.3.10.- Condiciones de contorno de exterior de las placas y de los planos de simetría.

3.3.5.2.- Condiciones iniciales

La única condición inicial, quitando las de contorno, es la velocidad del proyectil. En este trabajo solo se ha trabajado con un proyectil disparado a 1240 m/s. El intervalo de tiempo en el que se ha realizado el cálculo es de $1.2 \cdot 10^{-4}$ s. Se ha dividido el tiempo de cálculo, para la visualización, en 20 incrementos de $6 \mu\text{s}$.

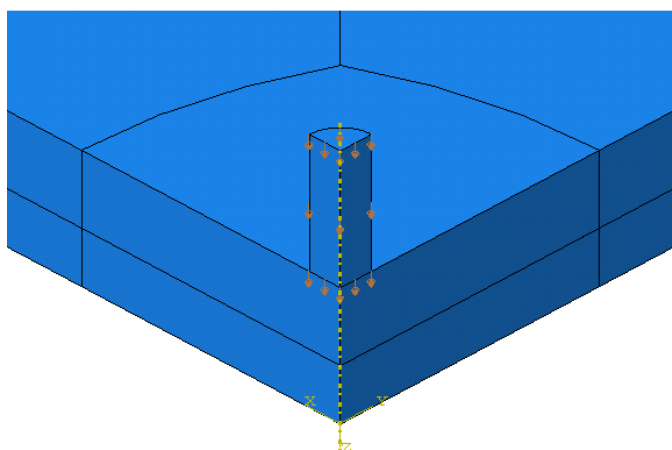


Figura 3.3.11.- Condición del campo de velocidades de 1240 m/s impuesto al proyectil.

3.3.6.- Mallado

Para disponer de una malla que otorgue unos resultados fiables con el mínimo tiempo de cálculo posible se ha optado por optimizar la malla, tanto del proyectil como de las placas por separado ya que ambos son de vital importancia en el análisis, mediante un análisis de sensibilidad de malla.

En ambos análisis la variable a estudiar ha sido la velocidad residual del proyectil. Para realizar el estudio de sensibilidad de la malla se ha ido aumentando el número de elementos, manteniendo constante el de las otras partes, hasta conseguir una diferencia despreciable entre los resultados.

Primeramente se ha realizado un análisis de sensibilidad con el Test-2, modificando únicamente el número de elementos del proyectil y dejando constante el de las placas. El número de elementos total de las placas es de 105000 de forma hexaédrica tipo C3D8R, teniendo 45000 la placa metálica y 60000 la cerámica. La parte más fina de la malla de las placas es de un milímetro, y según nos alejamos llegan a ser de diez mm (Figura 3.3.12). Además cabe mencionar que en todos los cálculos se han empleado

siempre 12 cpus, de esta manera la comparación de tiempos se realiza en igualdad de condiciones.

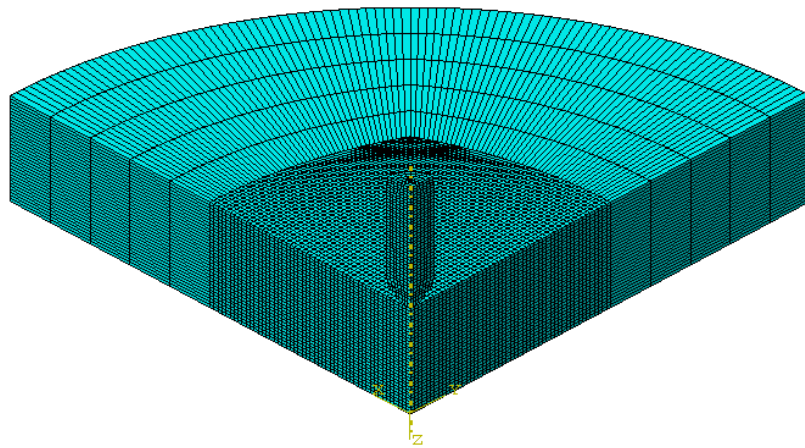


Figura 3.3.12.- Ejemplo de malla empleado para el primer análisis de malla (Tamaño de los elementos finos de las placas: 1mm / Tamaño de los elementos del proyectil: 1mm).

Se presentan a continuación las gráficas del análisis de malla para número de elementos de las placas constante. La primera (Figura 3.3.13) representa la variación de la velocidad residual en función del número de elementos del proyectil. La segunda (Figura 3.3.14) muestra la variación del tiempo de cálculo empleado en función también del número de elementos del proyectil. El mallado es homogéneo, de un milímetro de longitud cada elemento. De nuevo se han realizado los cálculos con 12 cpus para comparar adecuadamente.

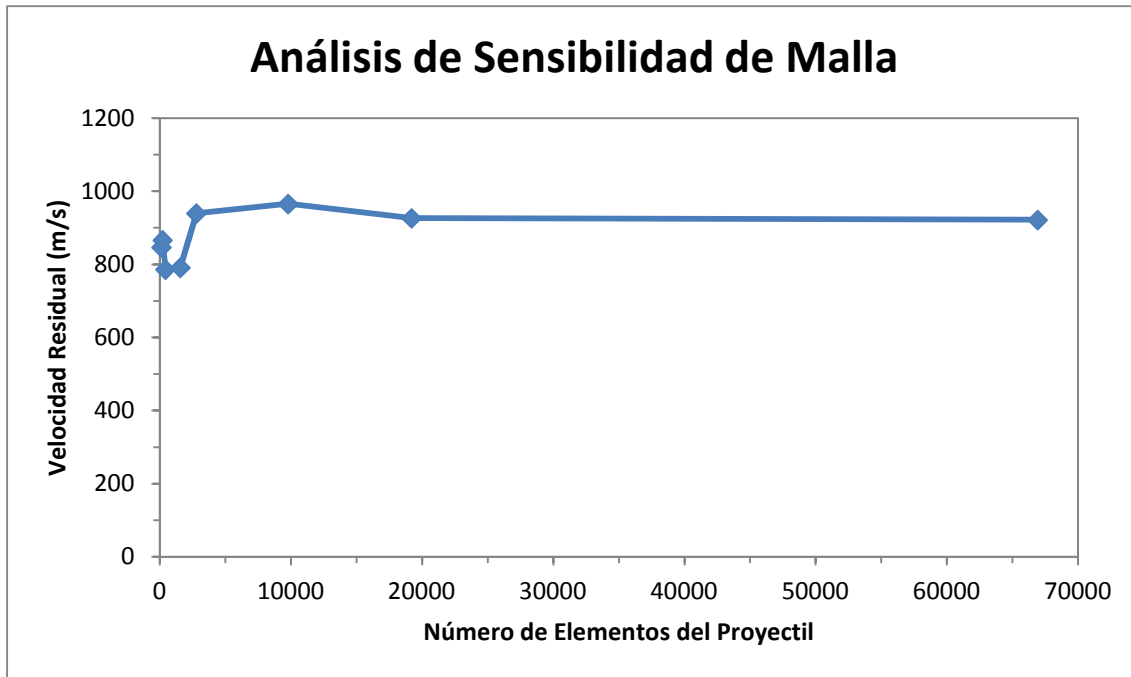


Figura 3.3.13.- Análisis de sensibilidad de malla para distinto número de elementos del proyectil.

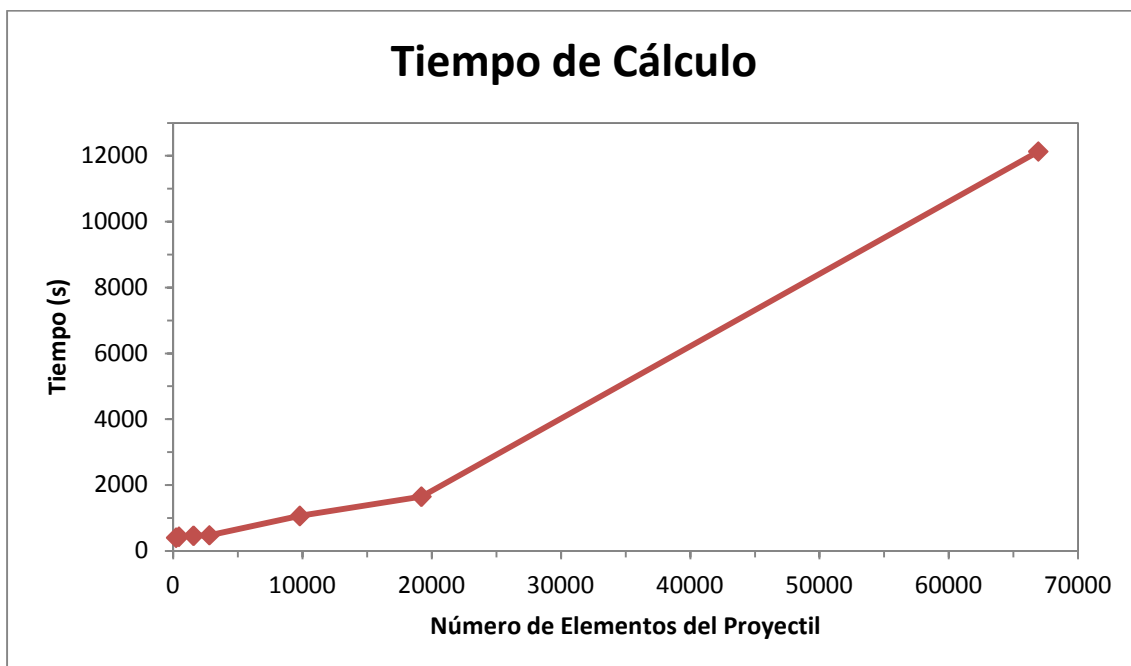


Figura 3.3.14.- Tiempo de cálculo empleado por Abaqus para simular el problema.

Como se observa en la Figura 3.3.13 a partir de unos 3000 elementos para el proyectil, la velocidad residual varía muy poco, por lo que se puede aceptar cualquier tamaño de malla a partir de este valor. Viendo los tiempos de cálculo necesarios, la mejor opción en precisión será tomar un número de elementos entre 20000 y 70000. Este último necesita una cantidad de tiempo demasiado alta, así que lo más adecuado

será un valor más bajo, que puede estar aproximadamente a la mitad del intervalo comentado.

En el siguiente análisis de sensibilidad, también con el Test-2, se ha modificado el número de elementos de las placas, dejando constante el del proyectil. El número de elementos total del proyectil, en este caso, será de 9792 de forma hexaédrica tipo C3D8R.

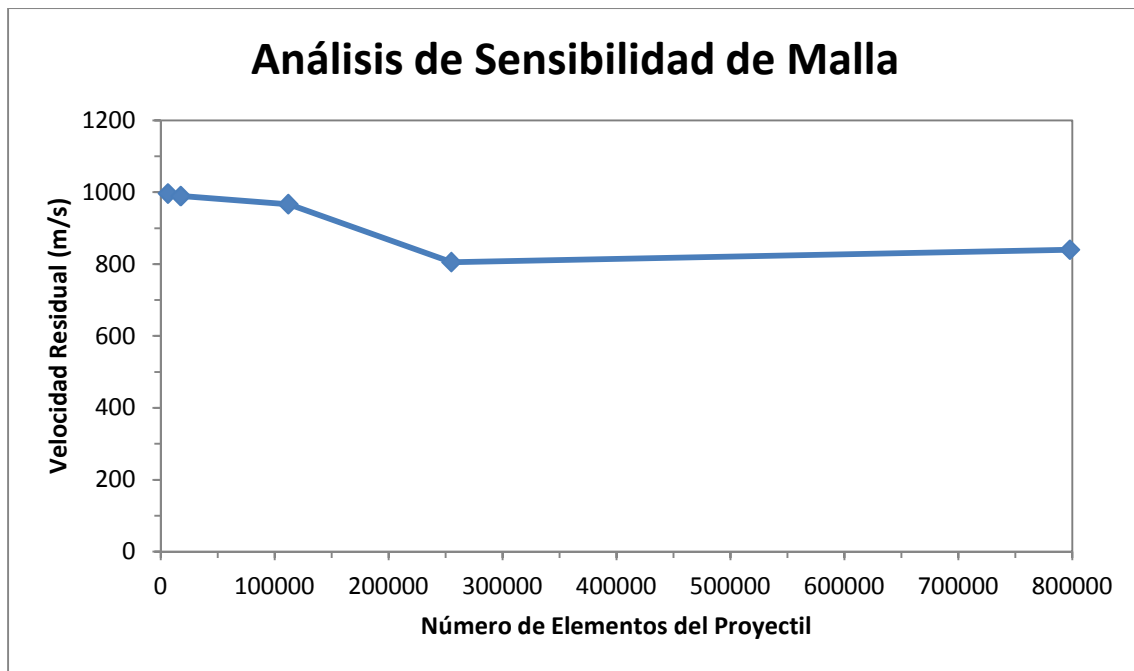


Figura 3.3.15.- Análisis de sensibilidad de malla para distinto número de elementos de las placas.

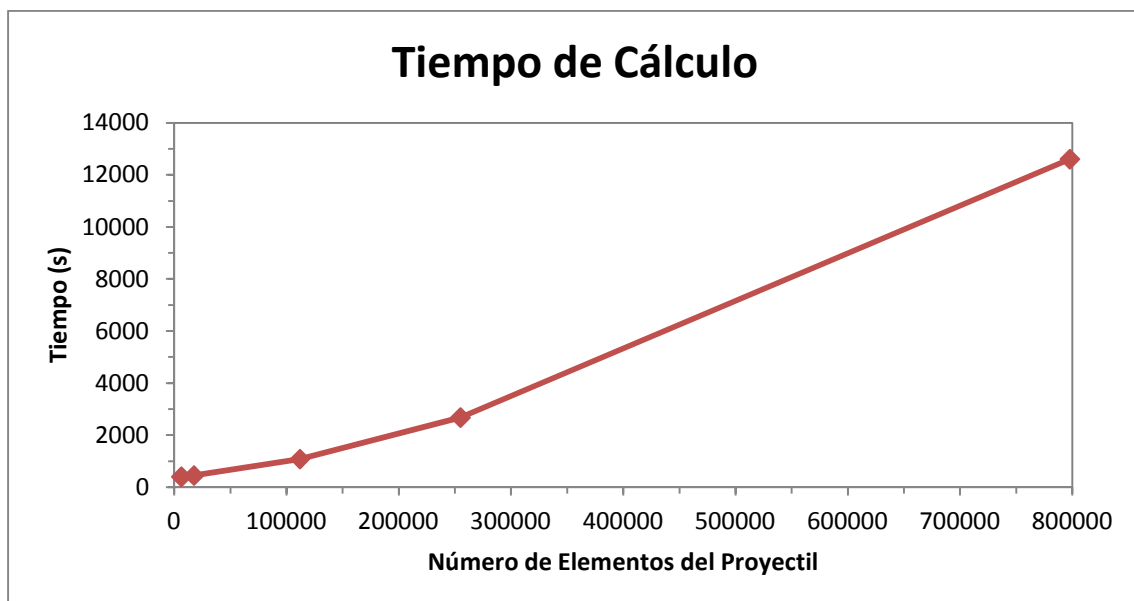


Figura 3.3.16.- Tiempo de cálculo empleado por Abaqus para simular el problema.

De igual manera que ocurrió en el análisis de malla anterior, se ha considerado como óptimo un número de elementos que no lleve mucho tiempo de cálculo pero con el que no sacrifiquemos la precisión. Así pues, viendo que a partir de los 150000 elementos la velocidad tiende a ser medianamente parecida, aunque se aumente el refinamiento de la malla, y a partir de 400000 elementos el tiempo de cálculo comienza a ser excesivo, se ha considerado oportuno escoger una malla para las placas que oscile entre los 150000 y los 300000.

Finalmente, viendo los análisis de sensibilidad de malla se ha intentado optimizar al máximo el tiempo de cálculo sin sacrificar la precisión de los resultados. Así pues, se ha escogido una malla de 39211 elementos para el proyectil (mallado homogéneo de 0,3 mm de longitud cada elemento), una de 217217 elementos para la placa cerámica y una de 161161 elementos para la placa metálica (ambas placas con un mallado con una variación desde 5 mm en la parte más gruesa a 0,65 mm en la parte más fina) (Figura 3.3.17). El total de los elementos, para el Test-2, es entonces 417589. De esta manera se han conseguido resultados con una precisión elevada y con simulaciones de menos de 60 minutos.

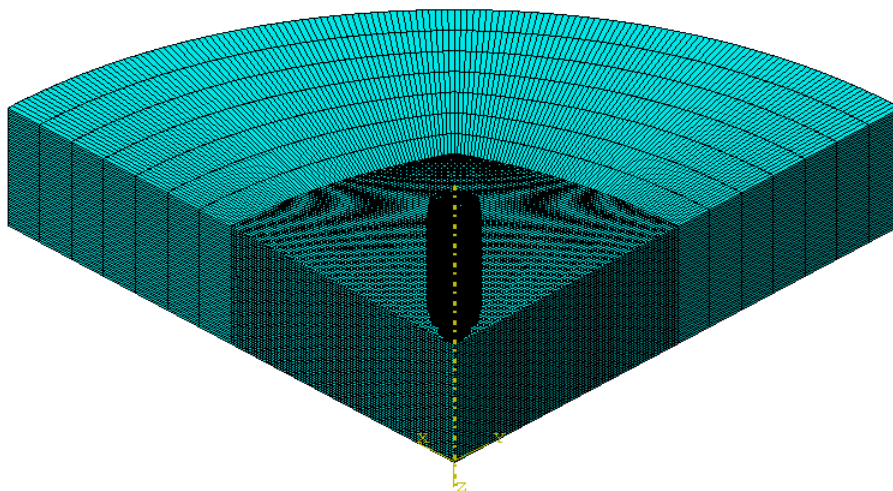


Figura 3.3.17.- Mallado final utilizado en todos los Test. En la imagen Test-2.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1.- Introducción

Se presenta y se valida en este capítulo el modelo numérico desarrollado, comparando los resultados obtenidos con los conseguidos por Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela en 2009. Dicha comparación se ha llevado a cabo cotejando las velocidades y longitudes residuales del proyectil para distintos blindajes. También se han comparado los blindajes expuestos entre sí, pudiendo ver la efectividad de cada uno de ellos.

Además de estas comparaciones se han propuesto una serie de cálculos propios, como han sido el cálculo de la velocidad de límite balístico o la fuerza ejercida por cada blindaje.

4.2.- Validación del modelo numérico

4.2.1.- Velocidades y longitudes residuales

En primera instancia, como se comentó en el apartado 1, se va a realizar la comparación de los resultados experimentales presentados por Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela en 2009 frente a los numéricos obtenidos. De esta manera se comprueba que la validación del modelo numérico para el sistema experimental expuesto es la adecuada. Los parámetros escogidos para la comparación han sido la velocidad residual del proyectil y la longitud residual del mismo. Tanto la velocidad residual como la longitud residual son los datos típicos de estudio del proyectil tras un impacto. En resumidas cuentas, es la velocidad y la longitud que se mide en el proyectil, habiendo este completado el proceso de perforación de un blindaje.

Ambos parámetros se han representado (Figura 4.2.1 y Figura 4.2.2) en función de la densidad areal de cada test ensayado (Ver Tabla 3.3.1), yendo en orden desde el Test-1 de menor densidad areal hasta el Test-4 de mayor densidad areal.

Para realizar dicha comparación se han representado de forma gráfica los valores obtenidos de velocidad y longitud residuales del proyectil. Así pues, con la obtención de unos resultados adecuados y fiables, el modelo numérico empleado, así como los

parámetros escogidos, podrán ser utilizados para la simulación de otros experimentos balísticos con un proyectil de tungsteno y un blindaje bi-capa alúmina/aluminio.

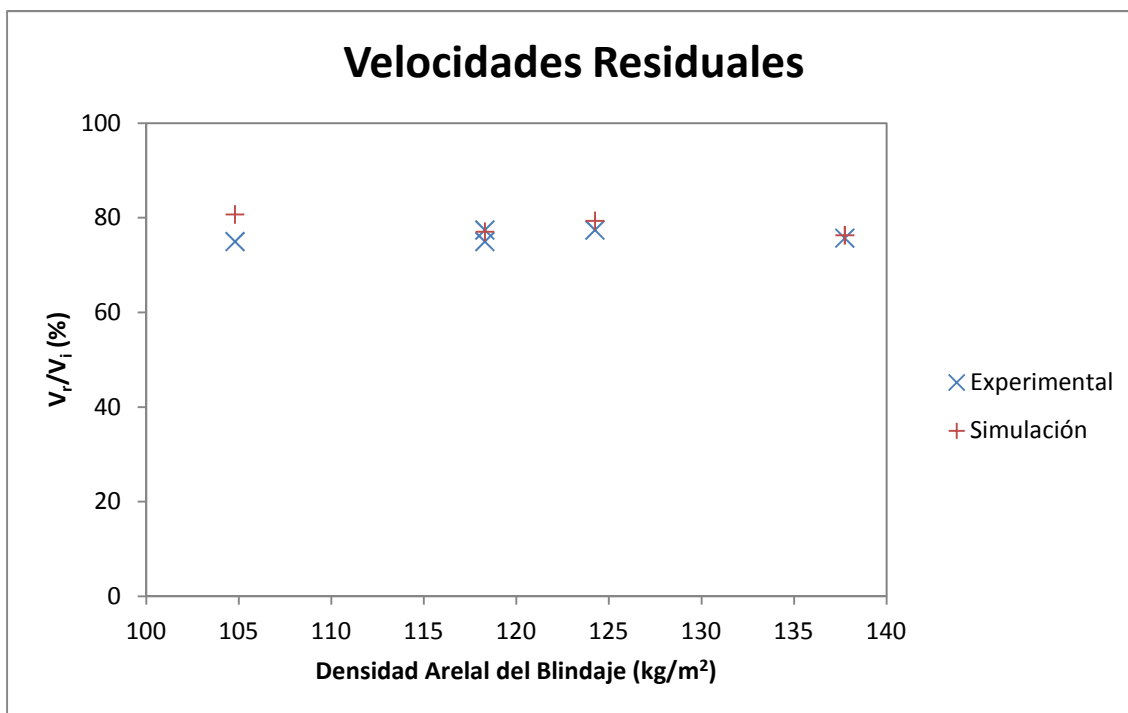


Figura 4.2.1.- Gráfico comparativo de la velocidad residual del proyectil frente a la densidad areal del blindaje para diferentes combinaciones de blancos.

De la Figura 4.2.1 se pueden observar los buenos resultados de velocidad residual obtenidos. En todos los casos expuestos los valores de velocidad residual obtenidos mediante el modelo numérico son similares a los valores experimentales. El único caso en el que el error es ligeramente mayor es el Test-1, con un error apenas superior al 7%. Así pues, podemos asumir, en cuanto a resultados de velocidad se refiere, que el modelo numérico tiene un comportamiento fiable. En la Tabla 4.2.1 se presentan los errores obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas.

	Experimental	Simulación	
Nº Test	Velocidad residual (m/s)		Error (%)
1	930	1001,23	7,11
2	930	955,426	2,66
	960		0,48
3	960	984,155	2,45
4	939	946,638	0,81

Tabla 4.2.1.- Diferencia de la velocidad residual entre los resultados experimentales y el modelo numérico.

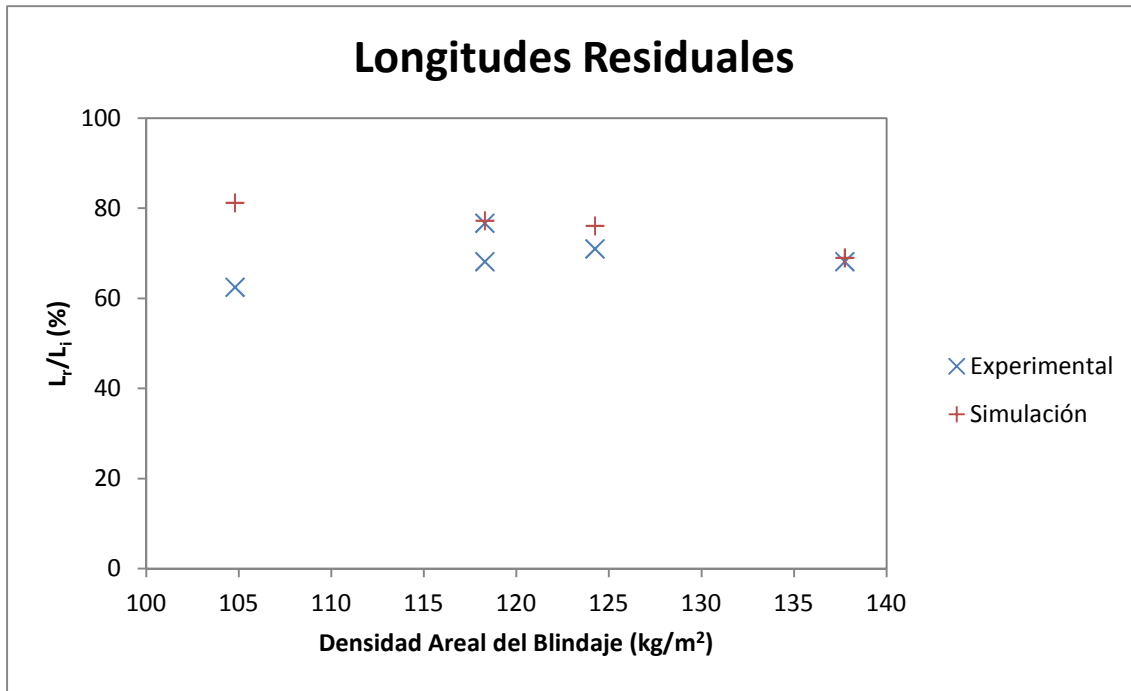


Figura 4.2.2.- Gráfico comparativo de la longitud residual del proyectil frente a la densidad areal del blindaje para diferentes combinaciones de blancos.

De igual manera, estudiando el gráfico de la Figura 4.2.2 se puede observar que los resultados siguen siendo adecuados, a pesar de diferir de manera más significativa que en el anterior. Siendo especialmente precisos los resultados del Test-2 y del Test-4, el único caso en el que los resultados no son precisos es el Test-1. Esta imprecisión puede deberse a una falta de exactitud en la medición experimental o un escaso número de ensayos experimentales con el que hacer una media probabilística de los resultados. Otros autores como R. Chi (2013) defienden esta misma hipótesis. La razón por la que se puede asumir que los resultados experimentales no son correctos se debe al escaso sentido que tiene que para un blindaje con la menor densidad areal la velocidad residual del proyectil sea la más baja así como la longitud residual del proyectil la más pequeña. Así pues, se podría concretar que los valores conseguidos con el modelo numérico son fiables con un porcentaje de error en general bastante bajo, presentados en la Tabla 4.2.2. Aun así se necesitaría realizar más ensayos experimentales del Test-1 para comprobar la completa fiabilidad del modelo.

	Experimental	Simulación	
Nº Test	Longitud residual (mm)		Error (%)
1	22	28,6	23,08
2	24	27,2	11,76
	27		0,74
3	25	26,8	6,72
4	24	24,3	1,23

Tabla 4.2.2.- Diferencia de la longitud residual entre los resultados experimentales y el modelo numérico.

4.2.2.- Evolución de la velocidad en función del tiempo

En el siguiente apartado se muestran las curvas de evolución de la velocidad de los diferentes *Test* y se realiza un pequeño análisis de cada una de ellas comentando los resultados obtenidos.

En la Figura 4.2.3 se presenta la evolución de la velocidad de todos los casos simulados. De esta manera se puede realizar una comparación de la actuación de cada uno de los blindajes empleados.

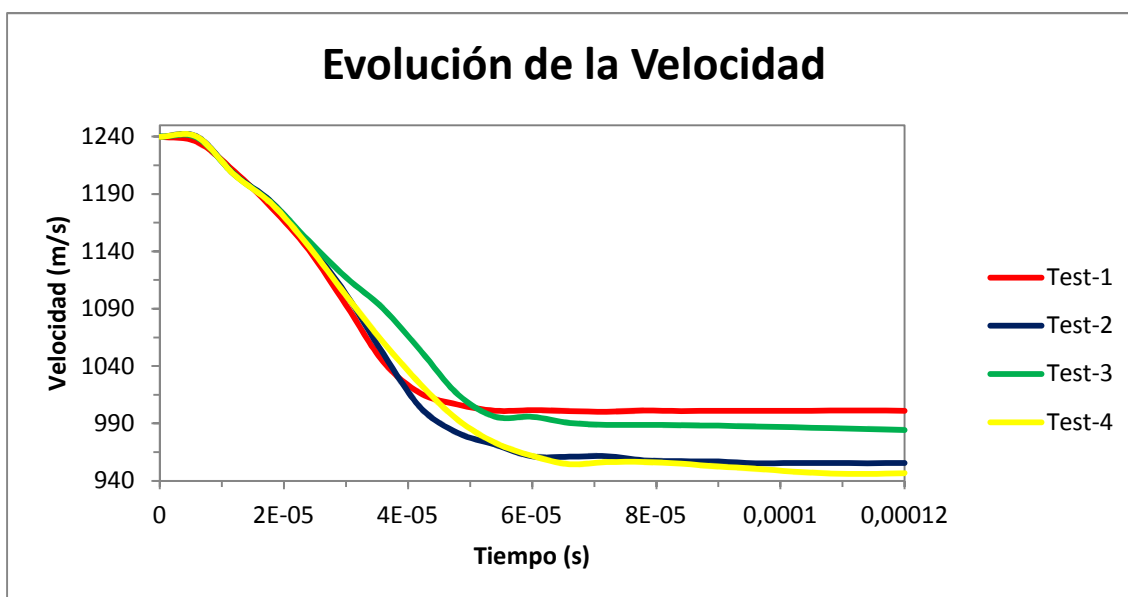


Figura 4.2.3.- Gráfico comparativo de la evolución de la velocidad para cada uno de los blindajes empleados en los ensayos experimentales.

Del gráfico se puede extraer el rendimiento de cada disposición de placas del blindaje. Para realizar un estudio más incisivo se podrían agrupar por pares los blindajes, como se ve en la Figura 4.2.3 los resultados de velocidad residual más próximos son el Test-1 con el Test-3 y el Test-2 con el Test-4.

Como se observa, los resultados de velocidad residual para blindajes con densidades areales diferentes pueden ser parecidos. En ello reside la particular importancia del análisis de distribución de las placas para un blindaje. En el caso del Test-2 tiene una velocidad de salida muy similar a la del Test-4 a pesar de tener una densidad areal considerablemente inferior. De esta manera podemos deducir que el comportamiento del blindaje del Test-2 (Alúmina/Aluminio: 20/15 mm) es especialmente bueno, siendo mejor que el Test-3, que con mayor densidad areal resulta ser un blindaje más laxo, cercano incluso a los resultados del de menor densidad areal (Test-1).

4.2.3.- Comparación de blindajes

De la Figura 4.2.4 a la Figura 4.2.7 se presenta la evolución de la velocidad relacionando los *Test* con mismos espesores de material cerámico (T_c) y metálico (T_m), siendo diferentes las placas contrarias. Es decir, para un mismo espesor de cerámica el espesor del metal es diferente y viceversa.

De esta manera se puede realizar una comparación de blindajes de doble capa cerámica/metal modificando únicamente uno de los parámetros influyentes en el proceso de impacto. Se valora así la importancia de aumentar o disminuir ciertos espesores para conseguir un blindaje con la mayor rentabilidad posible, teniendo en cuenta como restricciones principales el peso y el coste.

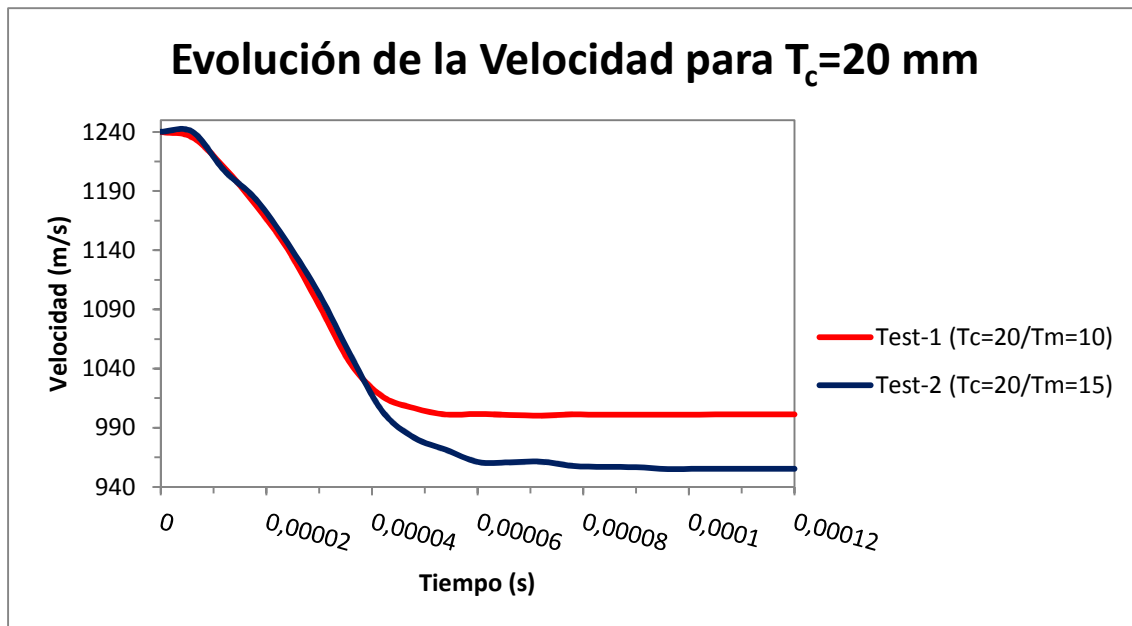


Figura 4.2.4.- Gráfica comparativa de la evolución de la velocidad para $T_c=20$ mm.

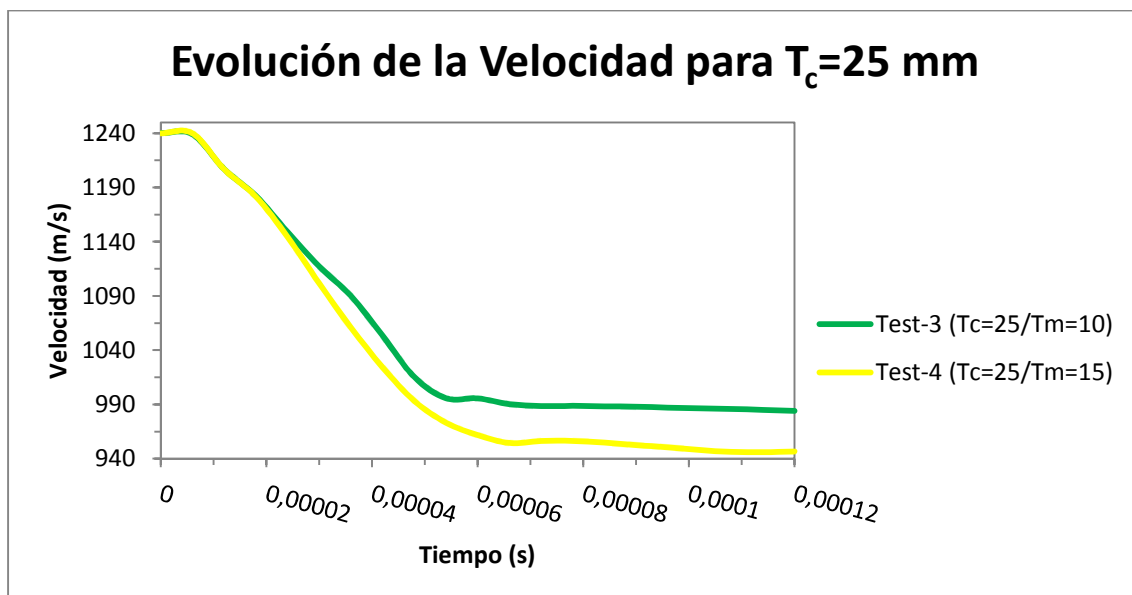


Figura 4.2.5.- Gráfica comparativa de la evolución de la velocidad para $T_c=25$ mm.

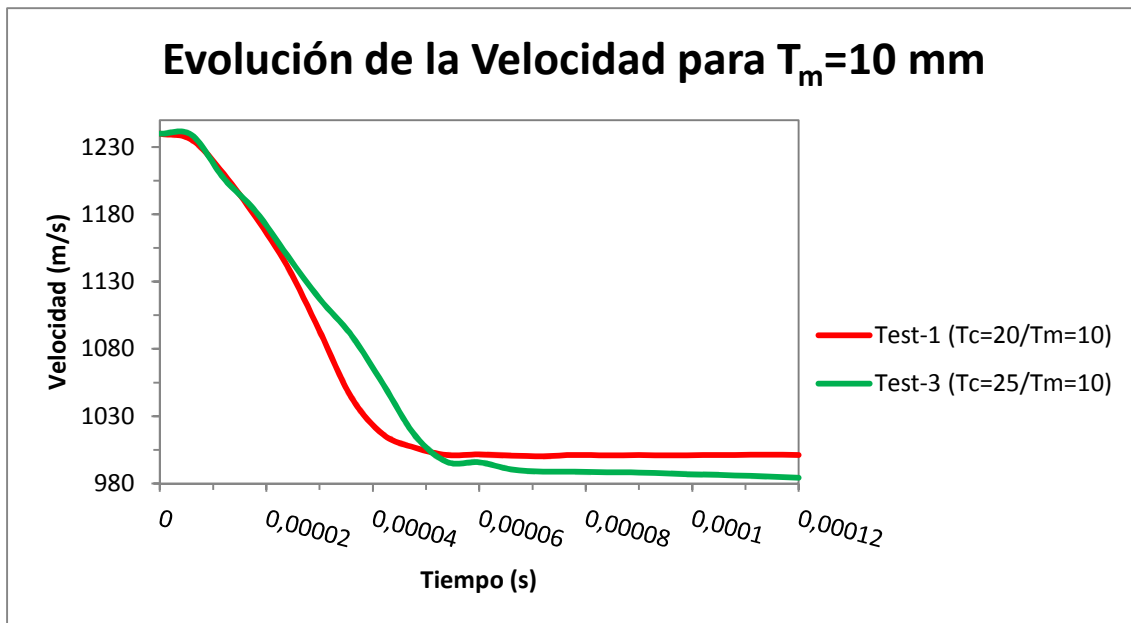


Figura 4.2.6.- Gráfica comparativa de la evolución de la velocidad para $T_m=10$ mm.

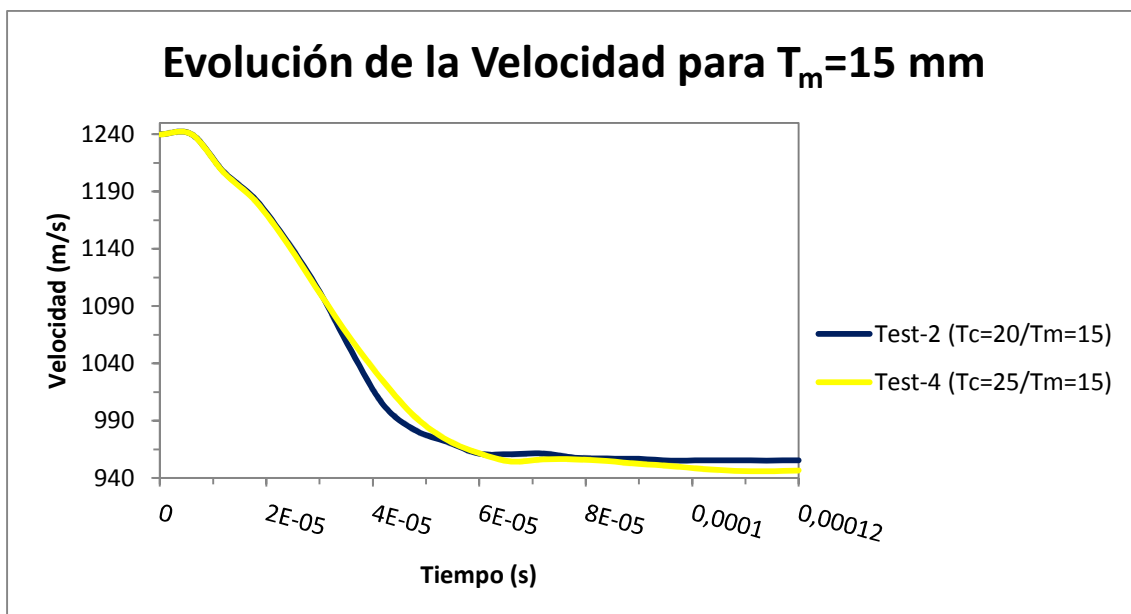


Figura 4.2.7.- Gráfica comparativa de la evolución de la velocidad para $T_m=15$ mm.

En las Figuras 4.2.4 y 4.2.5 se puede percibir la gran influencia que la placa posterior metálica ejerce en estos blindajes. La diferencia entre las velocidades residuales para estos casos es sustancial si, a espesor cerámico constante, se aumenta en 5 mm el espesor metálico. Por el contrario, como se observa en las Figuras 4.2.6 y 4.2.7, si es el espesor metálico el que se mantiene constante y aumentamos en 5 mm el espesor de la cerámica la diferencia entre las velocidades residuales es considerablemente más baja.

De hecho, la diferencia de velocidad residual entre el Test-2 y el Test-4 es tan escasa que se puede afirmar que el blindaje más rentable, tanto a nivel de protección balística como económico. Puesto que teniendo una densidad areal relativamente baja (menor impacto económico) consigue absorber casi la misma energía que el Test-4, siendo este el de mayor densidad areal.

4.2.4.- Límite Balístico

Otro de los datos más interesantes del cálculo de blindajes ligeros de cerámica/metal es la velocidad del límite balístico (BLV). Es decir, la velocidad inicial del proyectil a la cual no se produce perforación completa o la velocidad residual es nula. Se presentan a continuación el cálculo de las velocidades residuales de cada *Test* para diferentes velocidades de disparo. Además a cada una de las gráficas se le ha añadido una aproximación de las curvas analíticas propuestas por Lambert y Jonas en 1976, para comprobar el carácter veraz de los resultados.

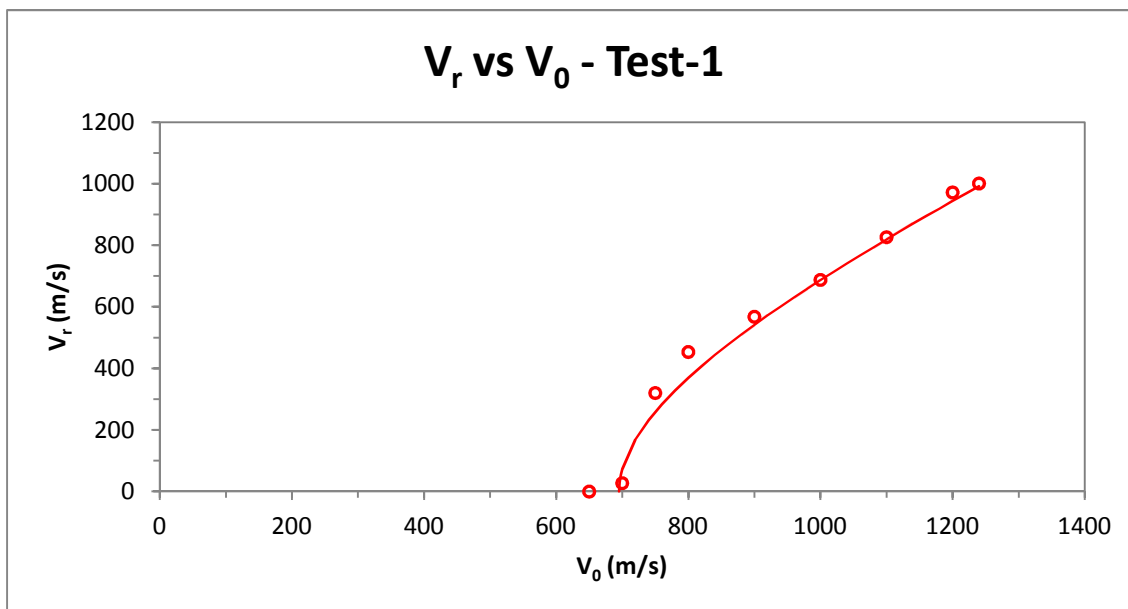


Figura 4.2.8.- Variación de la velocidad residual del proyectil frente a la velocidad de impacto para el Test-1.

Analizando brevemente la Figura 4.2.8 vemos que los resultados son bastante fiables y ajustados a la curva analítica representada, tanto en valor como en tendencia. El valor del límite balístico aproximado calculado para el Test-1 es de 695 m/s.

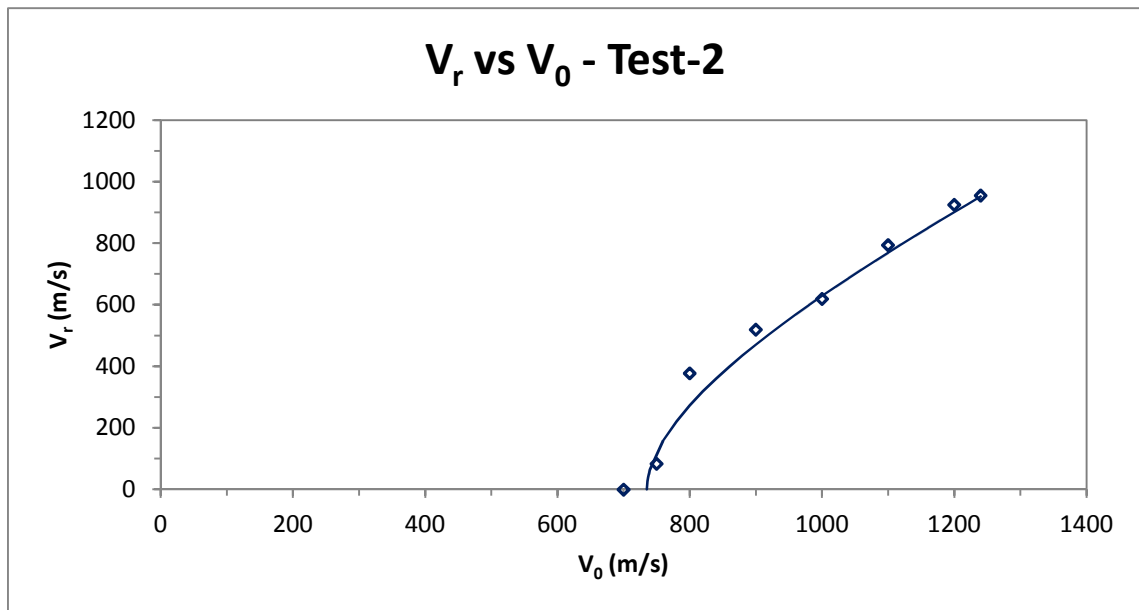


Figura 4.2.9.- Variación de la velocidad residual del proyectil frente a la velocidad de impacto para el Test-2.

De la misma manera que con la anterior, en la Figura 4.2.9 vemos que los resultados son fieles y se ajustan a la curva representada en valor y en tendencia. El valor aproximado del límite balístico para el Test-2 es de 735 m/s.

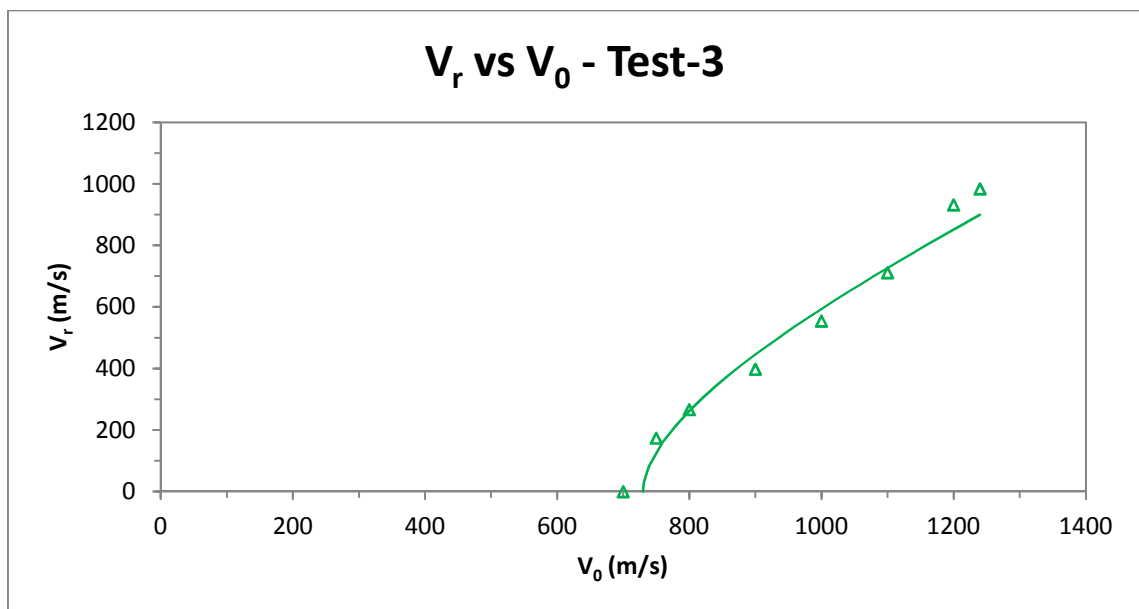


Figura 4.2.10.- Variación de la velocidad residual del proyectil frente a la velocidad de impacto para el Test-3.

En la Figura 4.2.10 se ve el buen ajuste en tendencia de los resultados simulados, a pesar de que algún valor sea menos preciso, en términos generales disponemos de unos resultados adecuados. El límite balístico obtenido para el Test-3 es de 730 m/s.

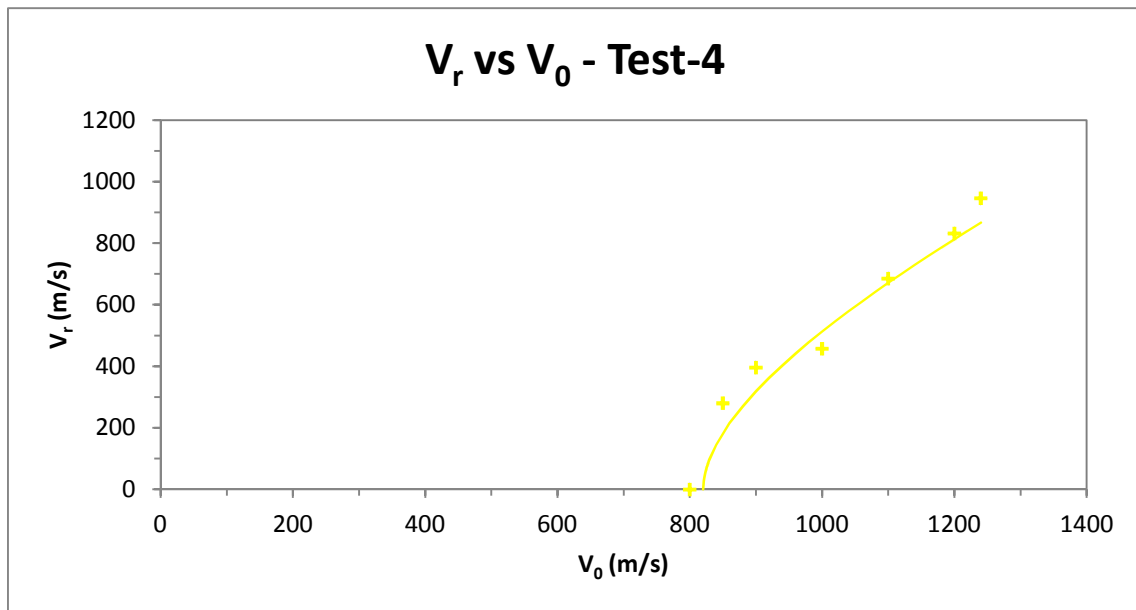


Figura 4.2.11.- Variación de la velocidad residual del proyectil frente a la velocidad de impacto para el Test-4.

En la Figura 4.2.11 se aprecia que la dispersión de resultados para este caso es mayor, es decir, que los datos se ajustan menos a la curva representada. Aun teniendo esto en cuenta, la tendencia es bastante aceptable y los resultados no son incongruentes, luego las soluciones conseguidas se pueden considerar aptas. El valor del límite balístico obtenido para el Test-4 es de 820 m/s.

4.2.5.- Deceleración y Fuerza

En el siguiente apartado se ha realizado un estudio de la deceleración generada por cada blindaje, pudiendo ver de esta manera tanto el tiempo que le lleva al blindaje reducir la velocidad del proyectil como la fuerza ejercida en dicha deceleración por el mismo.

Para ello se han recogido las velocidades iniciales y residuales del proyectil, de esta manera se ha calculado el incremento de velocidad provocado por cada blindaje (Tabla 4.2.1). Conociendo estos datos, se han obtenido los tiempos para los cuales la velocidad residual toma un valor constante (Tabla 4.2.1). Teniendo el incremento de velocidad y el tiempo que tarda el proyectil en penetrar el blindaje y mantener una velocidad constante, se ha calculado de manera aproximada la deceleración que provoca cada uno de los blindajes propuestos.

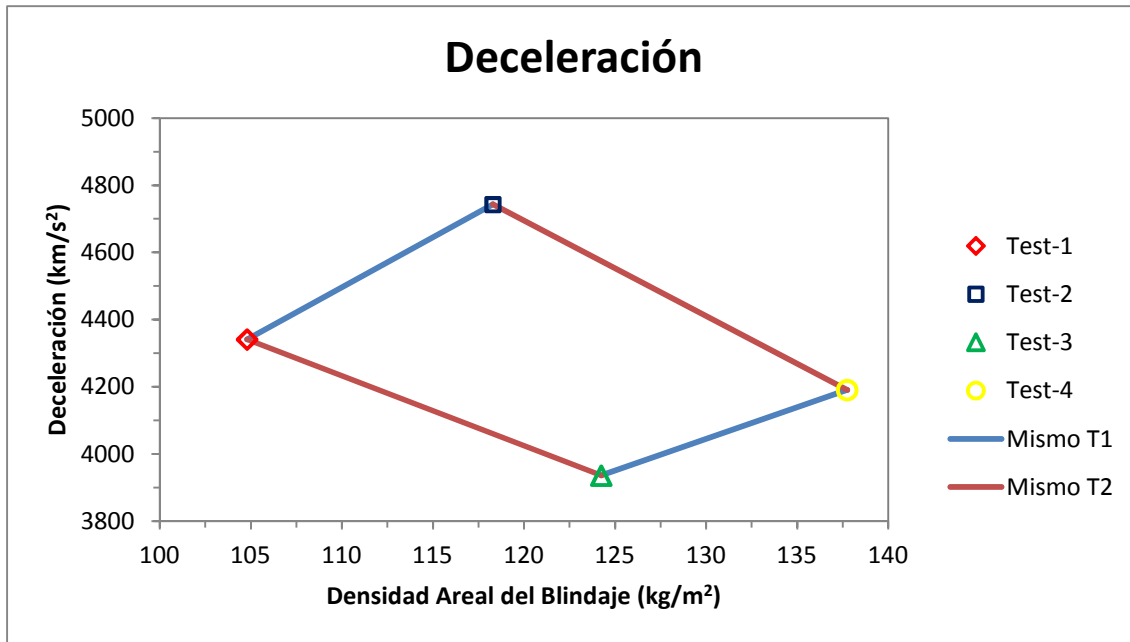


Figura 4.2.12.- Deceleraciones en función de la densidad areal para cada blindaje simulado.

El proceso de deceleración para el Test-1 ensayo se produce principalmente en los primeros 55 μ s, a partir de este tiempo tiende a mantener la velocidad. En estos primeros microsegundos se produce una deceleración de 1240 a 1001 m/s, es decir, aproximadamente 4341 km/s². En el Test-2, al tener un mayor espesor, el tiempo de deceleración aumenta (de 55 a 60 μ s) análogamente aumenta la deceleración de 1240 a 955 m/s (4742 km/s²). La deceleración sufrida por el proyectil en el Test-3 es de 3936 km/s², yendo del momento inicial a 1240 m/s a una velocidad de 984 m/s a los 65 μ s. En el Test-4 la deceleración es de 1240 a 947 m/s en 70 μ s obteniéndose así un valor de 4190 km/s².

Para la realización de estos cálculos se ha supuesto que la curva de velocidades, en la zona de deceleración, tiene forma recta. Es decir, se ha trazado una tangente a la curva de velocidades y se ha calculado su pendiente.

Para calcular la fuerza ejercida por las placas se realiza otra suposición. Dado que el proyectil a lo largo del proceso tiene una masa variable y conocemos la inicial y la final (aunque se podrían conocer los valores en los tiempos intermedios, se ha simplificado de esta manera para ahorrar tiempos de cálculo), se calcula la fuerza con la masa media a lo largo del impacto. De esta manera se ha supuesto que la masa media del proyectil para todo el proceso es:

$$m_{media} = \frac{m_{inicial} + m_{final}}{2}$$

Teniendo el valor de la aceleración y la masa media de cada caso, simplemente aplicamos la segunda ley de Newton, $F = m \cdot a$ y obtenemos los valores reflejados en la Figura 4.2.13.

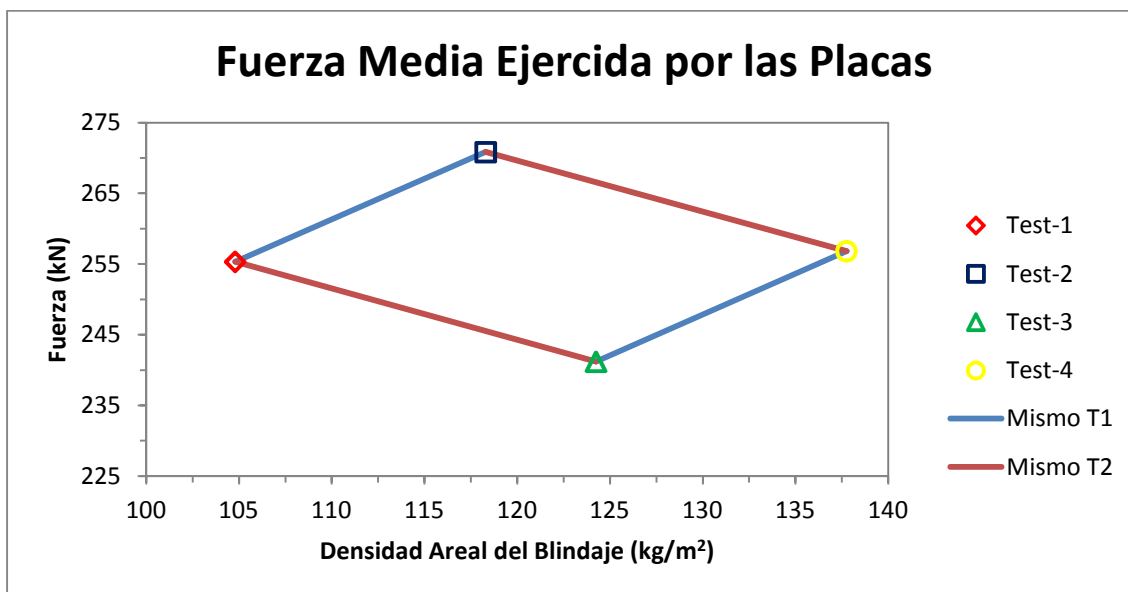


Figura 4.2.13.- Fuerza en función de la densidad areal para cada blindaje simulado.

En un rápido análisis de la Figura 4.2.13 observamos que el blindaje que más fuerza ejerce contra el proyectil es el del Test-2 y el que menos el del Test-3. Esto significa que para una baja densidad areal se obtienen también muy buenos resultados de fuerza de detención, demostrándose de nuevo la importancia del diseño de blindajes. Tanto en la Figura 4.2.12 como en la Figura 4.2.13 se han relacionado los resultados según los espesores de material cerámico y metálico.

4.2.6.- Comportamiento del modelo numérico

Se presentan los mapas de tensiones de las placas para los cuatro casos simulados, para poder así observar con más facilidad el comportamiento del modelo. Las primeras figuras muestran el proceso de impacto de cada *Test*, dividiéndolo en cuatro fases (25%, 50%, 75% y 100% del proceso). Las dos últimas figuras ofrecen un detalle del comportamiento de las placas. En la Figura 4.2.18 se observan los contornos de daño (o concentración de tensiones) en forma cónica de la placa cerámica durante los primeros microsegundos del proceso. En la Figura 4.2.19 se ve la forma cónica de 60° generada por el impacto y la perforación.

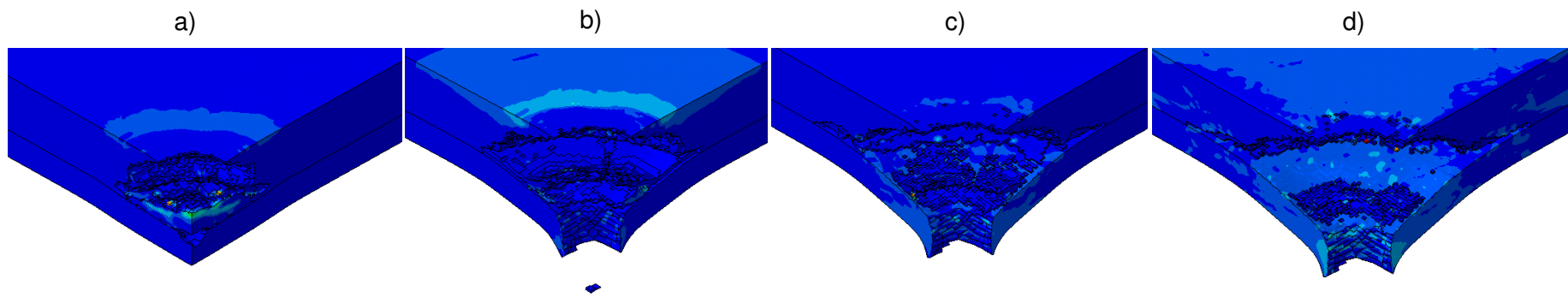


Figura 4.2.14.- Detalle del campo tensional de un blindaje de 20 mm de alúmina y 10 mm de aluminio para un impacto normal a 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación].

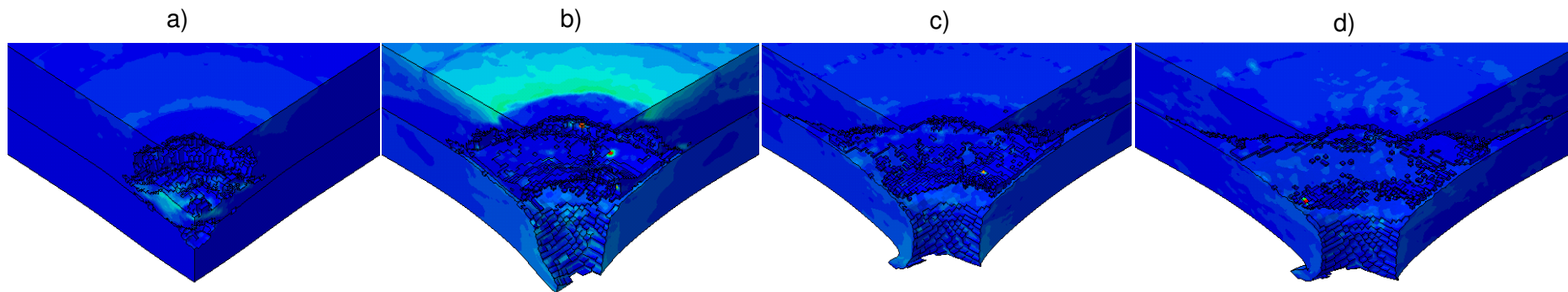


Figura 4.2.15.- Detalle del campo tensional de un blindaje de 20 mm de alúmina y 15 mm de aluminio para un impacto normal a 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación].

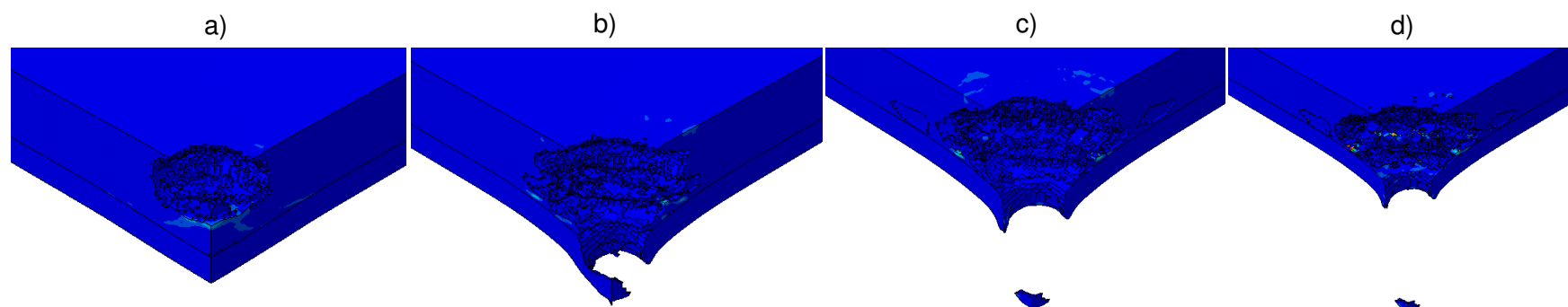


Figura 4.2.16.- Detalle del campo tensional de un blindaje de 25 mm de alúmina y 10 mm de aluminio para un impacto normal a 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación].

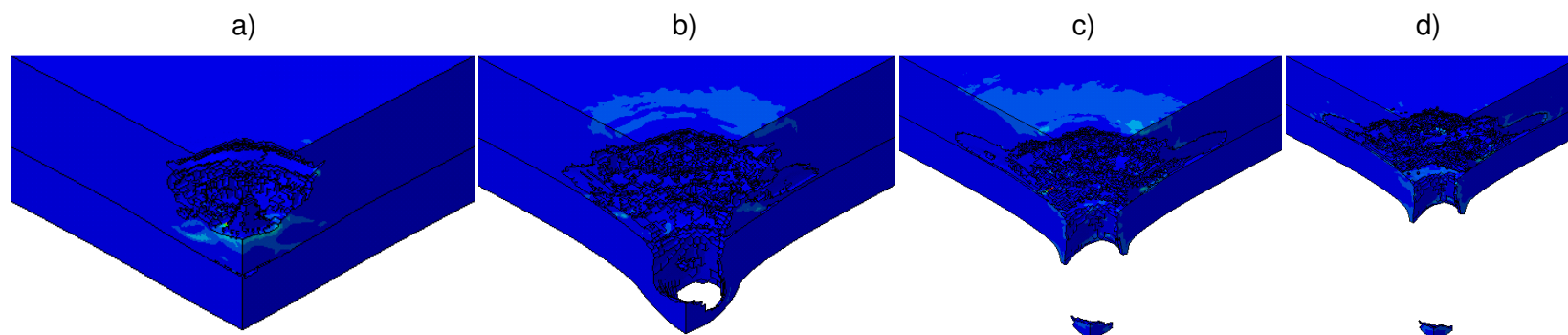


Figura 4.2.17.- Detalle del campo tensional de un blindaje de 25 mm de alúmina y 10 mm de aluminio para un impacto normal a 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación].

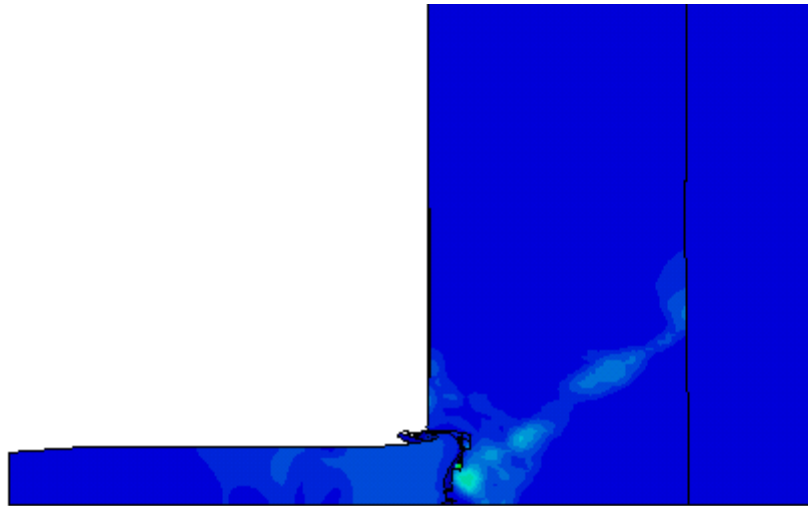


Figura 4.2.18.- Detalle de los contornos de daño en el material cerámico en los primeros microsegundos del proceso para el modelo JH-2 empleado.

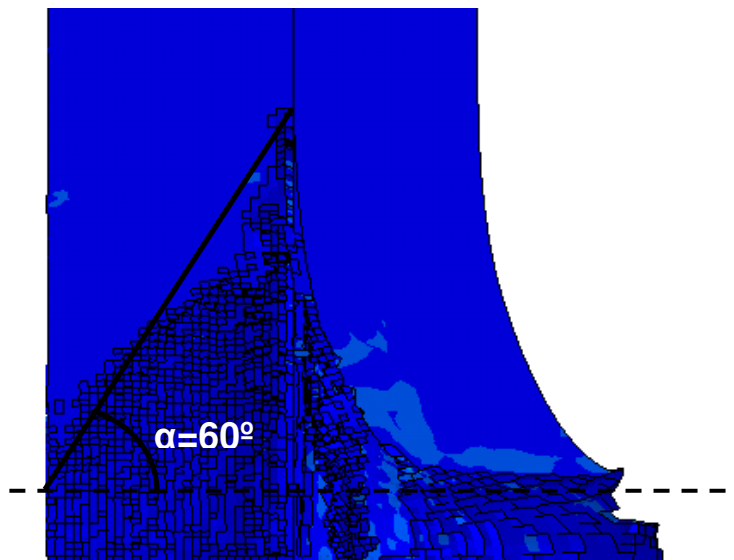


Figura 4.2.19.- Detalle de las placas tras el impacto y la penetración. Formación del tronco cónico en el material cerámico de unos 60°.

CAPÍTULO 5: OTROS ESTUDIOS

5.1.- Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de nuevas simulaciones utilizando el modelo numérico validado anteriormente. Se ha dividido los objetivos de este capítulo en dos partes:

- Impactos oblicuos
- Estudio de una serie de curvas analíticas propuestas por R. Chi en 2013.

Se han realizado estos estudios con el fin de entender mejor y comprobar la validez del modelo cerámico/metal empleado.

5.2.- Impactos oblicuos

5.2.1.- NATO 50º

Habiendo analizado y simulado con una precisión medianamente alta los casos de impacto normal a la superficie de las placas de blindaje se propone a continuación las simulaciones, menos precisas, de ensayos de impacto oblicuo. Así pues, de igual manera que como se ha hecho anteriormente se va a exponer una comparación de los datos experimentales frente a los datos simulados (Figuras 5.2.1 y 5.2.2). Los datos experimentales utilizados han sido de nuevo los propuestos por Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela en 2009. En dicha comparación se exponen las velocidades y las longitudes residuales en función de la densidad areal de cada blindaje. En la Tabla 5.2.1 se puede ver los espesores de cada blindaje simulado para un impacto oblicuo tipo NATO 50º.

Como se acaba de comentar, la simulación realizada ha sido menos precisa que las anteriores de impacto normal. Esto se resume en un engrosamiento de la malla y una simplificación del proyectil. La malla, sigue siendo suficientemente fina para obtener resultados adecuados aunque se han empleado elementos de mayor tamaño. En cuanto al proyectil, su compleja geometría se ha simplificado en un cilindro de 12 mm de diámetro y 36 mm de longitud. Ambos cambios se han aplicado debido a las

nuevas características del problema. En este caso solo podemos aplicar una simetría, es decir que el tamaño del problema es el doble que el de los casos anteriores. Se muestra un esquema del modelo empleado para las simulaciones oblicuas, así como una muestra de la malla empleada en el impacto NATO 50°.

Nº. test	T_c (mm)	T_m (mm)	$V_{res.}$ (m/s)	$L_{res.}$ (mm)
1	15	10	912-956	19-25
2	18	15	776	19
3	20	10	836-874	20-24

Tabla 5.2.1.- Configuración de espesores y resultados experimentales de un blindaje cerámico-metal con un proyectil tipo APDS de 20 mm para un impacto oblicuo NATO 50° (Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela 2009).

Se presenta a continuación los resultados simulados frente a los experimentales para impactos oblicuos NATO 50°.

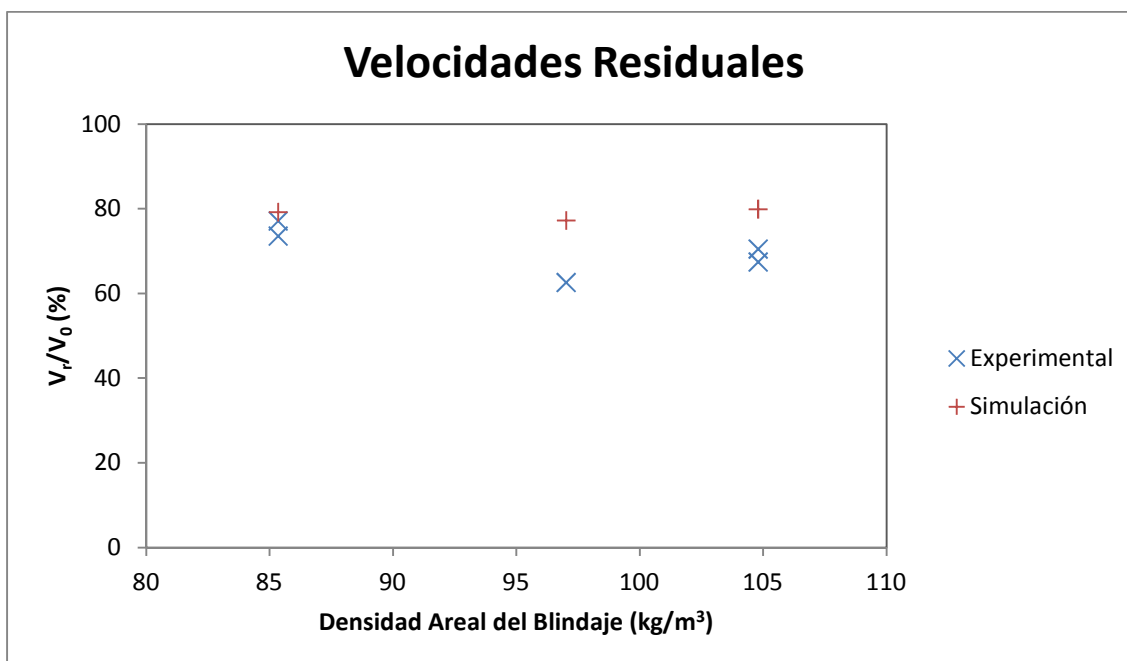


Figura 5.2.1.- Gráfico comparativo de la velocidad residual del proyectil frente a la densidad areal del blindaje para diferentes combinaciones de blancos en un impacto oblicuo NATO 50°.

Estudiando los resultados expuestos en el gráfico de la Figura 5.2.1 se advierte a primera vista que los resultados son menos precisos que para un impacto normal. Aun así, viendo los errores obtenidos (Tabla 5.2.2) podemos aceptar como válidos los resultados obtenidos, con excepción quizás del Test-2 que tiene un error que roza el 20%. Asumiendo que los resultados son medianamente precisos, podemos fijarnos

ahora en la tendencia de los datos. Como se puede ver, la tendencia de las simulaciones es bastante similar a la de los resultados reales. En resumidas cuentas, teniendo en cuenta únicamente la velocidad podemos aceptar como válido el modelo para impactos oblicuos. A pesar de ello quedaría pendiente realizar una serie de análisis y ajustes más detallados para este tipo de impactos.

	Experimental	Simulación	
Nº Test	Velocidad residual (m/s)		Error (%)
1	912	981,982	7,13
	956		2,65
2	776	957,815	18,98
3	836	990,835	15,63
	874		11,79

Tabla 5.2.2.- Diferencia de la velocidad residual entre los resultados experimentales y el modelo numérico para un impacto NATO 50°.

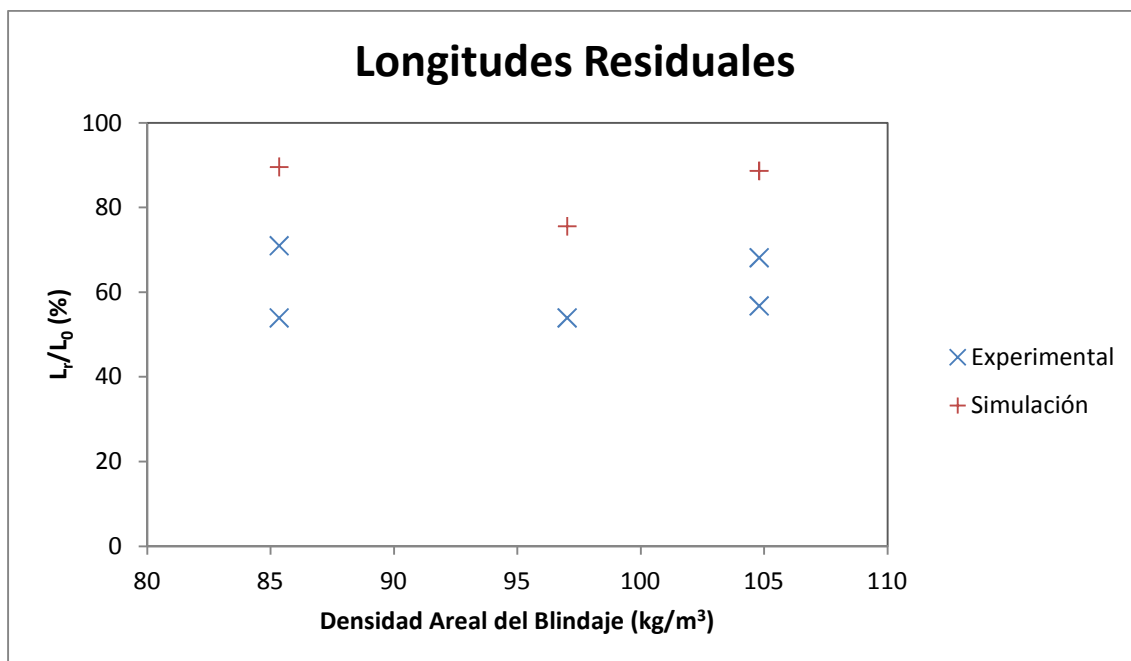


Figura 5.2.2.- Gráfico comparativo de la longitud residual del proyectil frente a la densidad areal del blindaje para diferentes combinaciones de blancos en un impacto oblicuo NATO 50°.

Para las longitudes residuales, los resultados obtenidos (Figura 5.2.2) muestran la tendencias similares. Los datos difieren más de un 20% el más preciso, llegando hasta un casi un 40% de error (Tabla 5.2.3). A pesar de los resultados tan alejados, si analizamos los errores obtenidos en los resultados experimentales podemos apreciar

que los resultados conseguidos en la simulación no son especialmente significativos, estando los simulados dentro del orden de error empírico.

	Experimental	Simulación	
Nº Test	Longitud residual (mm)		Error (%)
1	19	31,55	39,78
	25		20,76
2	19	26,62	28,63
3	20	31,22	35,94
	24		23,13

Tabla 5.2.3.- Diferencia de la longitud residual entre los resultados experimentales y el modelo numérico para un impacto NATO 50º.

Se exponen a continuación imágenes explicativas sobre el modelo empleado para simular el impacto NATO 50º, así como el comportamiento durante el proceso de perforación (Figura 5.2.5 – Figura 5.2.7). La Figura 5.2.3 presenta la configuración en 3D del impacto y la Figura 5.2.4 la malla empleada en la simulación vista en el plano de simetría.

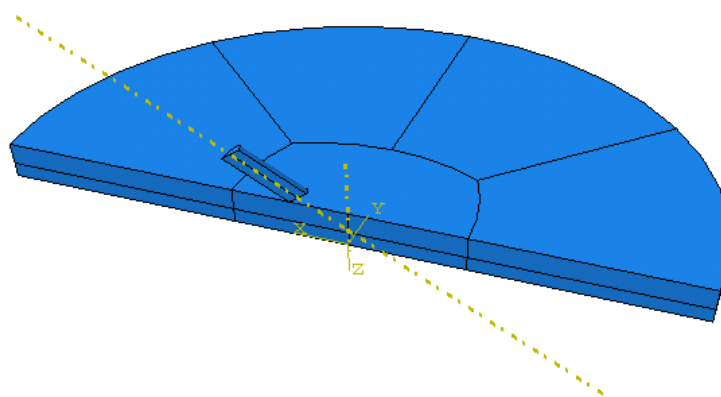


Figura 5.2.3.- Configuración y particiones del modelo de impacto oblicuo NATO 50º.

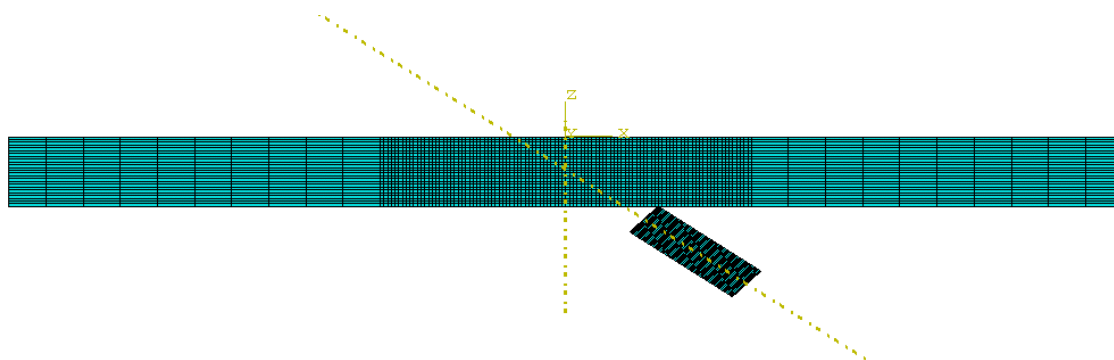


Figura 5.2.4.- Vista en el plano de simetría de la malla empleada en el modelo de impacto oblicuo NATO 50º.

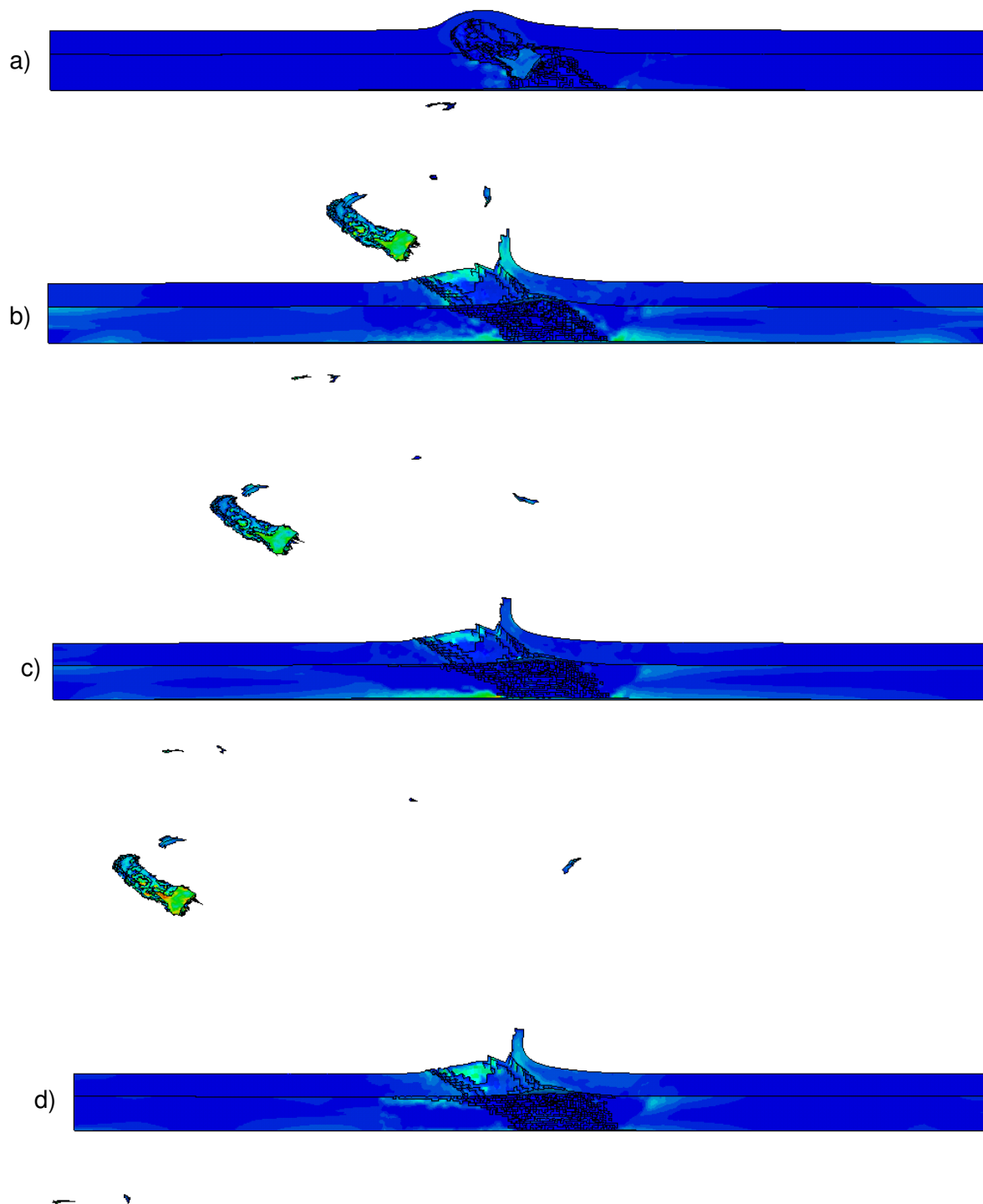


Figura 5.2.5.- Campo tensional para un impacto a 50° y 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS contra un blindaje de 15 mm de alúmina y 10 mm de aluminio. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación]

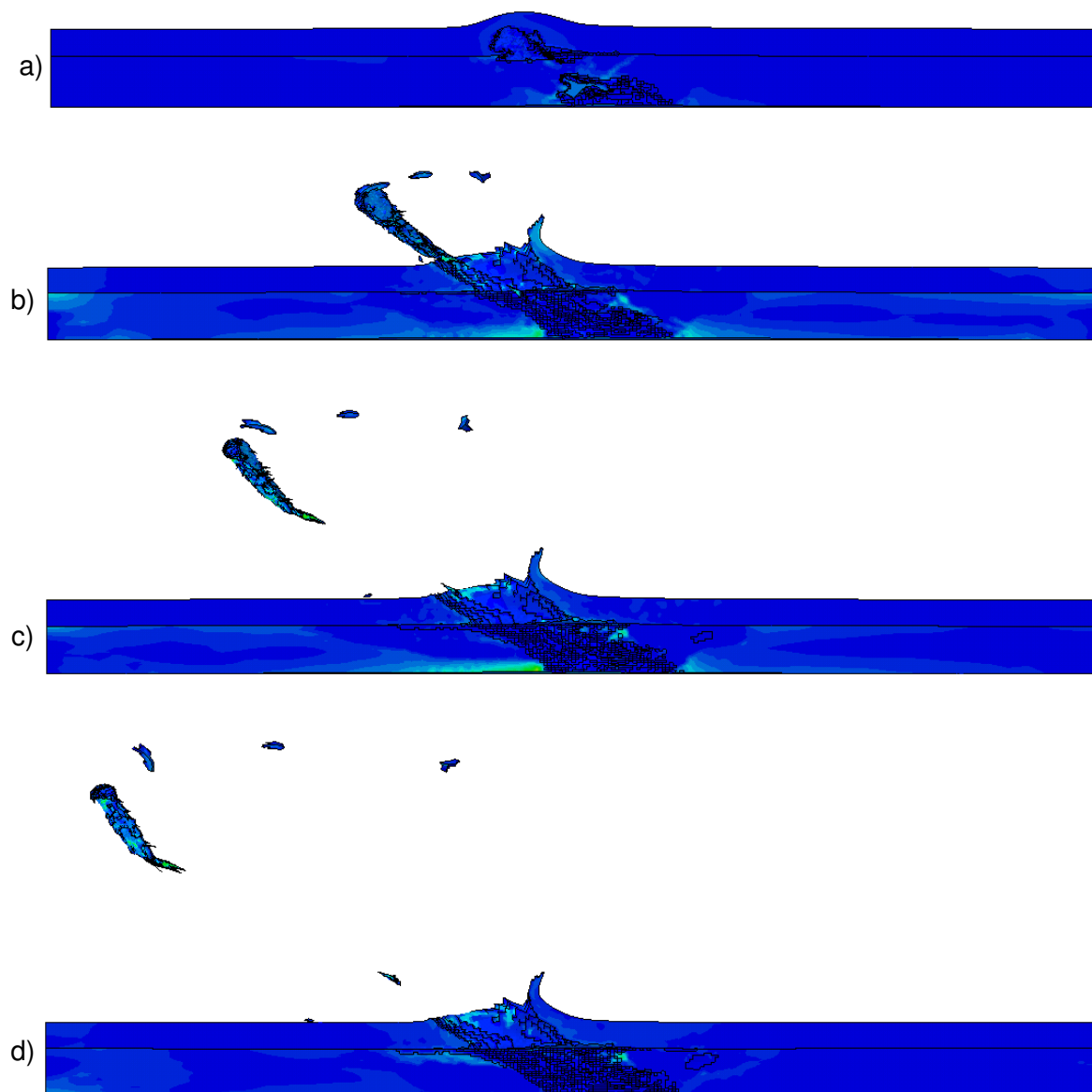


Figura 5.2.6.- Campo tensional para un impacto a 50° y 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS contra un blindaje de 18 mm de alúmina y 10 mm de aluminio. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación]



Figura 5.2.7.- Campo tensional para un impacto a 50° y 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS contra un blindaje de 20 mm de alúmina y 10 mm de aluminio. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación]

5.2.2.- NATO 60°

También se ha realizado un estudio de los ensayos experimentales de Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela de 2009 para impactos oblicuos NATO 60°. El modelo base empleado ha sido el mismo que para las simulaciones NATO 50°, salvo ciertos cambios en la malla. Dada la inclinación del impacto el proyectil tiene una trayectoria que recorre las placas de manera más significativa que para una inclinación menor, así que se ha decidido aumentar la parte fina de la malla central en la zona de salida del proyectil (ver Figura 5.2.11 y 5.2.12).

En cuanto al resto, se mantiene todo igual, salvo los espesores que se cambian según el ensayo que se esté simulando (Tabla 5.2.4).

<i>Nº. test</i>	<i>T_c (mm)</i>	<i>T_m (mm)</i>	<i>V_{res.} (m/s)</i>	<i>L_{res.} (mm)</i>
1	15	9	813-941	20-24
2	18	10	465	15
3	20	8	1090	19

Tabla 5.2.4.- Configuración de espesores y resultados experimentales de un blindaje cerámico-metal con un proyectil tipo APDS de 20 mm para un impacto oblicuo NATO 60º (Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela 2009).

Se presenta a continuación los resultados simulados frente a los experimentales para impactos oblicuos NATO 60º.

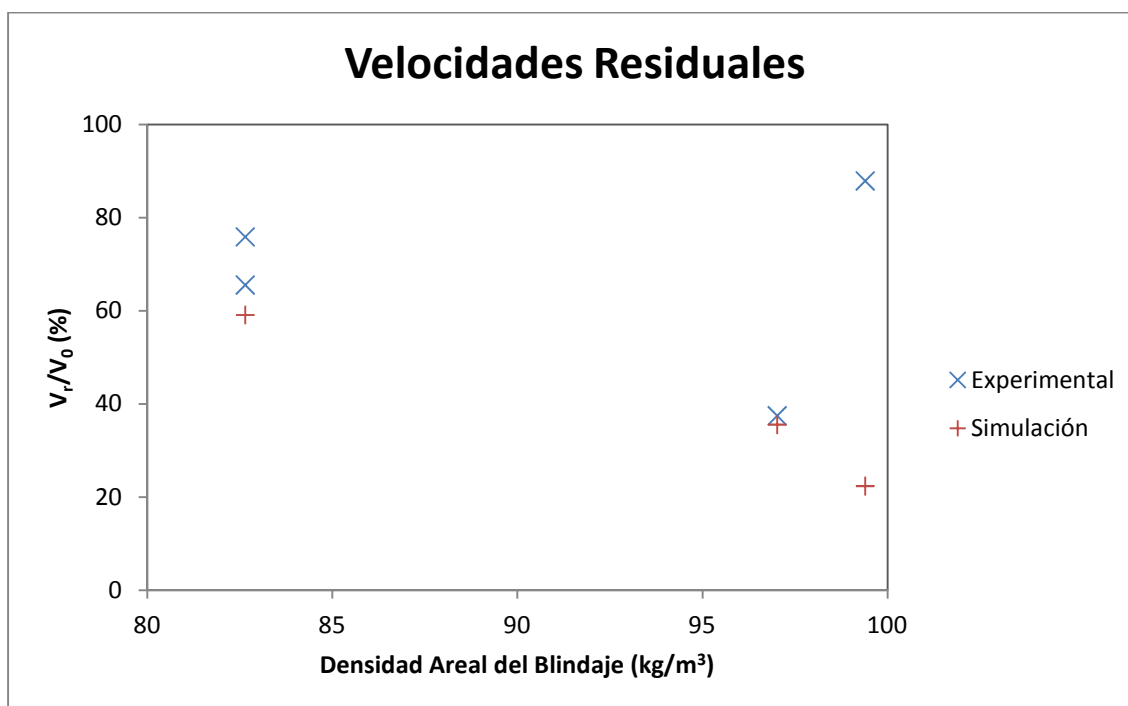


Figura 5.2.8.- Gráfico comparativo de la velocidad residual del proyectil frente a la densidad areal del blindaje para diferentes combinaciones de blancos en un impacto oblicuo NATO 60º.

Los resultados de velocidad obtenidos para el impacto oblicuo NATO 60º son bastante dispares. Los dos primeros *Test*, los resultados de velocidad, podrían considerarse óptimos, con un error que oscila entre un 5 y un 20% aproximadamente (Tabla 5.2.5). Mientras que para el último caso simulado el error obtenido es llamativo, llegando casi a un 75% de error (Tabla 5.2.5). Concluyendo, se puede decir que el modelo trabaja bien en líneas generales, como en el Test-1 y el Test-2, pero sería recomendable hacer una serie de simulaciones más precisas para el último caso. Quizás también realizar un número mayor de ensayos experimentales pudiera servir

para salir de cualquier tipo de duda, pues es curioso que el blindaje con mayor densidad areal sea el menos protector (en el que mayor residual se consigue). Aunque en el caso expuesto se podría entender, ya que el espesor de la cerámica no es especialmente grueso y es parecido al de los anteriores casos (20 mm), mientras que el espesor del aluminio es más delgado que el resto de casos (8 mm). Esto puede provocar que debido a la fragilidad del cerámico este no consiga decelerar el proyectil apenas y al tener una placa fina de metal, este consiga escasamente mantener los pedazos fragmentados de cerámica así como deformarse para decelerar el proyectil.

	Experimental	Simulación	
Nº Test	Velocidad residual (m/s)		Error (%)
1	813	733,312	9,8
	941		22,07
2	465	441,359	5,08
3	1090	277,754	74,52

Tabla 5.2.5.- Diferencia de la velocidad residual entre los resultados experimentales y el modelo numérico para un impacto NATO 60º.

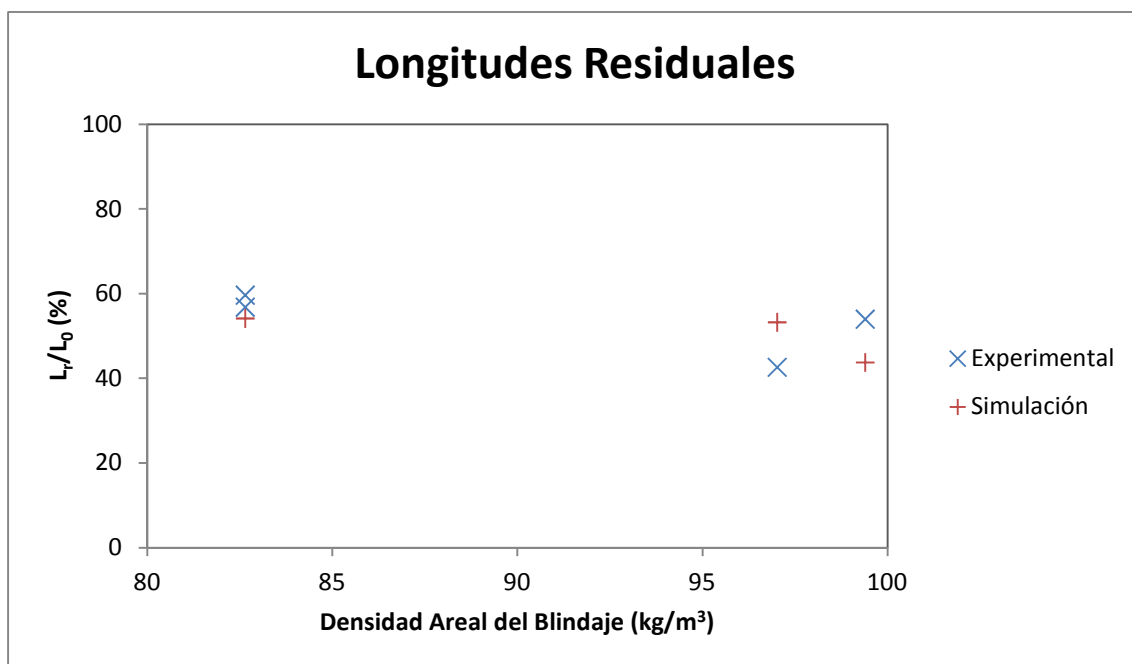


Figura 5.2.9.- Gráfico comparativo de la longitud residual del proyectil frente a la densidad areal del blindaje para diferentes combinaciones de blancos en un impacto oblicuo NATO 60º.

Los resultados conseguidos en la longitud residual en general son bastante precisos. A pesar de no cumplir la tendencia que presentan los datos experimentales, las máximas diferencias o errores son de un 20%, para el Test-2 y3. En definitiva, se

puede afirmar que el modelo, para longitudes residuales, respalda adecuadamente el comportamiento real del blindaje. Aunque habría que realizar modelos más precisos para comprobar la veracidad total de este, así como verificar si la tendencia de resultados es acorde con la tendencia real.

	Experimental	Simulación	
Nº Test	Longitud residual (mm)		Error (%)
1	20	19,06	4,7
	21		9,24
2	15	18,74	19,96
3	19	15,4	18,95

Tabla 5.2.6.- Diferencia de la longitud residual entre los resultados experimentales y el modelo numérico para un impacto NATO 60°.

Se exponen a continuación imágenes explicativas sobre el modelo empleado para simular el impacto NATO 60°. La Figura 5.2.10 presenta la configuración en 3D del impacto y las figuras 5.2.11 y 5.2.12 la malla empleada en la simulación, vista en 3D y en el plano de simetría respectivamente.

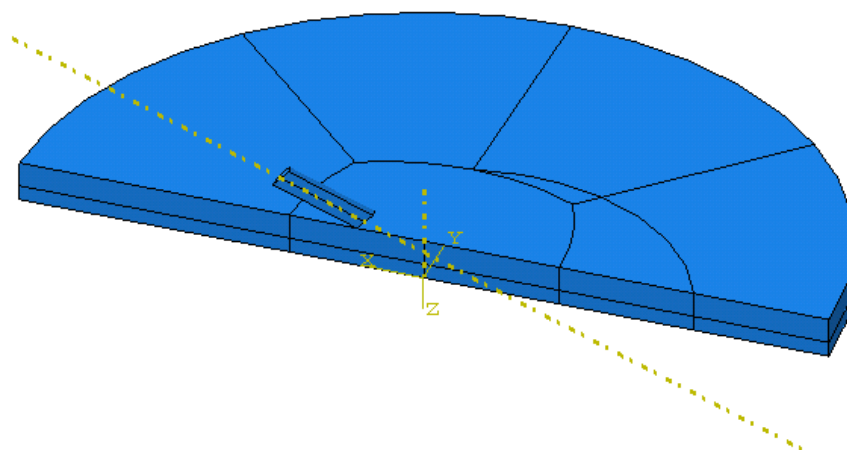


Figura 5.2.10.- Configuración y particiones del modelo de impacto oblicuo NATO 60°.

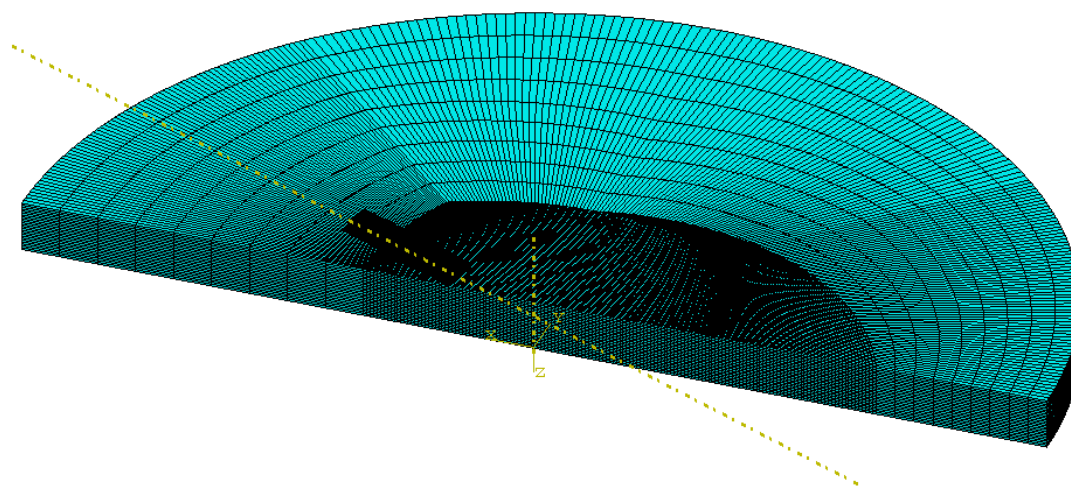


Figura 5.2.11.- Vista en perspectiva de la malla empleada en el modelo de impacto oblicuo NATO 60°.

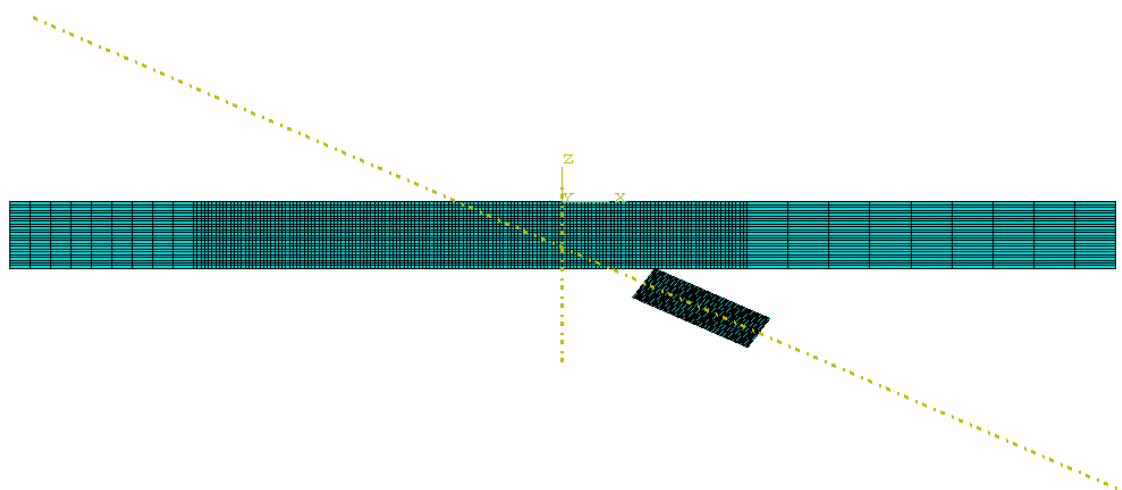


Figura 5.2.12.- Vista en el plano de simetría de la malla empleada en el modelo de impacto oblicuo NATO 60°.

De la Figura 5.2.13 a la Figura 5.2.15 se presenta el comportamiento del modelo numérico, de todos los casos simulados, durante el proceso de perforación para diferentes momentos de tiempo.



Figura 5.2.13.- Campo tensional para un impacto a 60° y 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS contra un blindaje de 15 mm de alúmina y 9 mm de aluminio. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación]



Figura 5.2.14.- Campo tensional para un impacto a 60° y 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS contra un blindaje de 18 mm de alúmina y 10 mm de aluminio. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación]

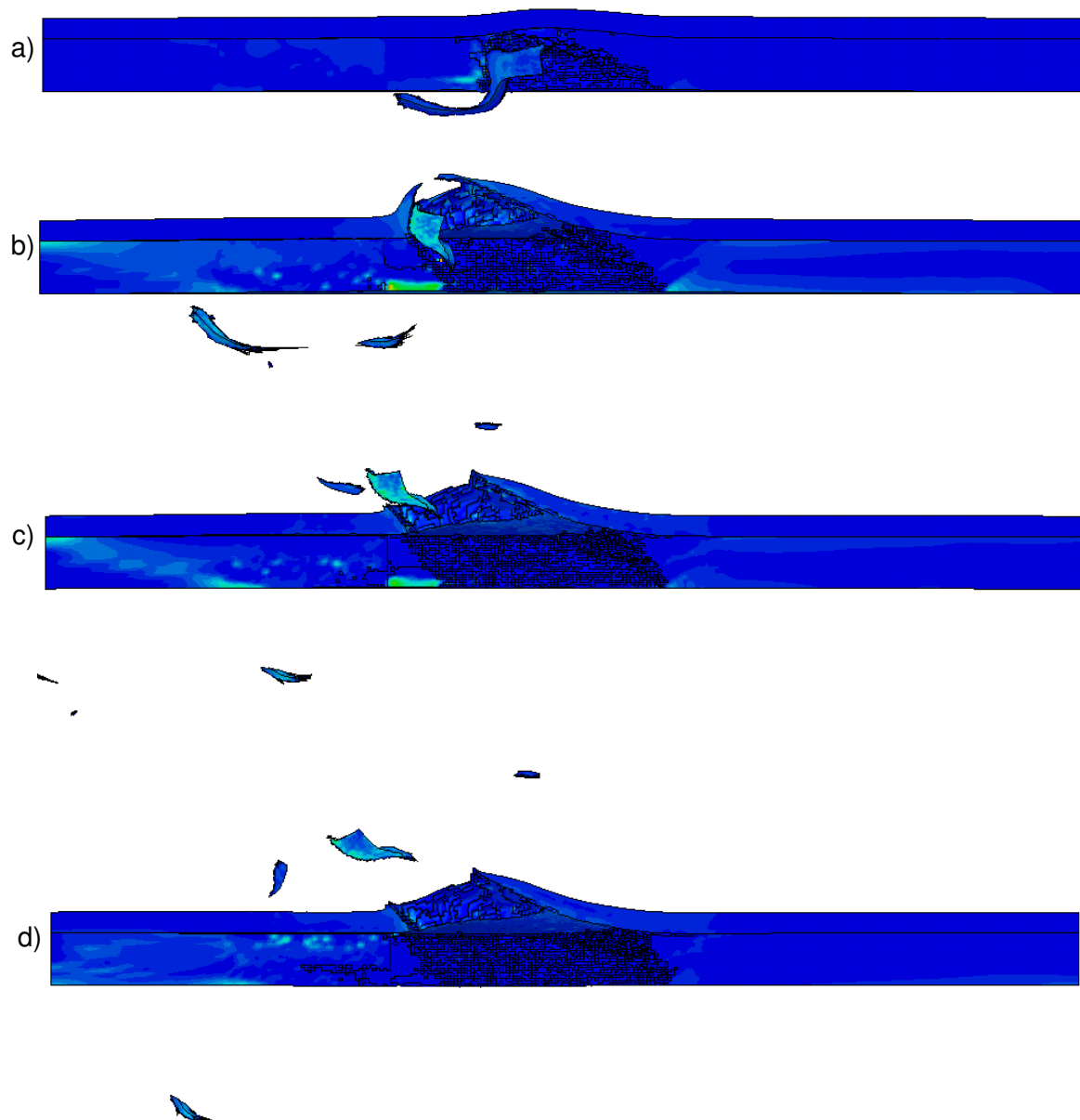


Figura 5.2.15.- Campo tensional para un impacto a 60° y 1240 m/s de un proyectil 20 mm APDS contra un blindaje de 20 mm de alúmina y 8 mm de aluminio. [a) 25% b) 50% c) 75% d) 100% del proceso de perforación]

5.3.- Validación numérica de ecuación analítica para la Velocidad del Límite Balístico (BLV)

En este apartado se pretende, mediante el modelo numérico diseñado, validar la ecuación para el cálculo del límite balístico propuesta por R. Chi en 2013.

La ecuación propuesta se obtiene relacionando los espesores de las placas del blindaje con el diámetro del proyectil, así como la longitud de este con su diámetro (T_c/D_p , T_m/D_p y L_p/D_p):

$$\frac{V_{bl}}{\sqrt{Y_p/\rho_p}} = \left[0,44 \cdot \left(\frac{T_1}{D_p} \right)^{1,1} + 1,04 \cdot \left(\frac{T_1}{D_p} \right)^{0,68} \cdot \left(\frac{T_2}{D_p} \right)^{0,62} + 1,38 \cdot \left(\frac{T_2}{D_p} \right)^{0,44} \right] \cdot \left(\frac{L_p}{D_p} \right)^{-0,57}$$

- donde:
- V_{bl} es la velocidad del límite balístico
 - $\sqrt{Y_p/\rho_p}$ es un parámetro intrínseco del proyectil
 - T_c es el espesor de la placa cerámica
 - T_m es el espesor de la placa metálica
 - D_p es el diámetro del proyectil
 - L_p es la longitud del proyectil

Los datos empleados en la ecuación se han agrupado de dos maneras, la primera en función del espesor total del blindaje y la segunda en función de la densidad areal del blindaje. Para ello, se ha representado la velocidad en el límite balístico en función de la normalización de un parámetro del espesor de las placas del blindaje: T_c/TT , donde TT es el espesor total; y AD_1/AD , donde AD_1 es la densidad areal de la placa cerámica y AD es la densidad areal total del blindaje. Es decir:

- Para el primer caso: si $T_c = 0 \rightarrow T_m = TT$, si $T_c = 0,1 \rightarrow T_m = 0,9 \cdot TT$, así hasta $T_c/TT=1 \rightarrow T_c = TT \rightarrow T_m = 0$.
- Para el segundo caso: si $AD_1 = 0 \rightarrow AD = AD_2$, $AD_1 = 0,1 \rightarrow AD_2 = 0,9 \cdot AD$, así hasta $AD_1/AD=1 \rightarrow AD_1 = AD \rightarrow AD_2 = 0$ (siendo AD_2 la densidad areal de la placa metálica).

Tanto para las simulaciones como para la ecuación expuesta, la compleja geometría del proyectil se ha simplificado en un cilindro de 12 mm de diámetro y 36

mm de longitud. Además, el valor del parámetro $\sqrt{Y_p/\rho_p}$, que sirve para adimensionalizar la expresión del límite balístico, para un proyectil de tungsteno como el que se dispone es de 292,5 m/s.

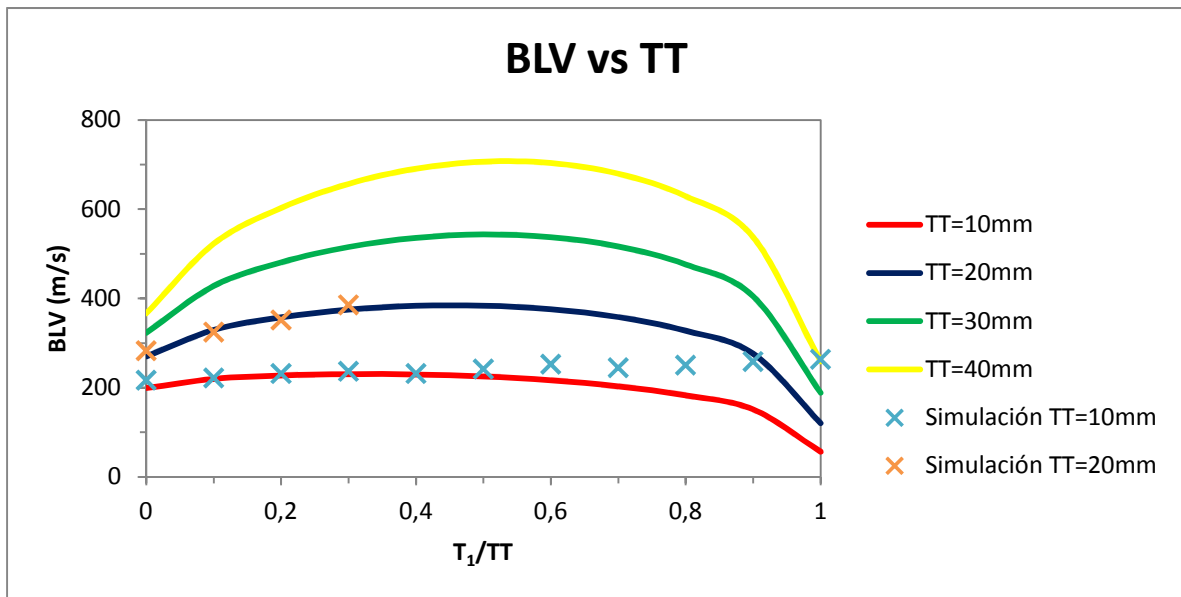


Figura 5.3.1.- Velocidad en el límite balístico (BLV) en función del espesor normalizado de la placa frontal cerámica (Resultados analíticos, ec. Velocidad de límite balístico (p. 90), y simulados).

En la Figura 5.3.1 se han representado las curvas analíticas para cuatro espesores totales de blindaje (10 mm, 20 mm, 30 mm, 40mm) y se han añadido los valores obtenidos con el modelo numérico para $TT = 10 \text{ mm}$ y algunos de los valores calculados para $TT = 20 \text{ mm}^*$.

Se observa en la Figura 5.3.1 que para espesores de la placa frontal cerámica bajos, los puntos simulados se ajustan perfectamente a la curva analítica. Mientras que para espesores en los que la cerámica comienza a ser predominante, los resultados de la simulación empiezan a diferir de manera cada vez más acusada. Esto ofrece una visión del buen comportamiento del modelo metálico, tanto aisladamente como en conjunto con el cerámico.

La diferencia de los resultados obtenidos cuando la cerámica es la más influyente, probablemente venga de las condiciones de contorno utilizadas en el modelo, tanto las de simetría como las propias del problema (encastre en los extremos). Dichas condiciones provocan un aumento de la rigidez de la placa cerámica, que provoca que el comportamiento de la cerámica bajo estas condiciones sea menos frágil que el que se observa en la realidad.

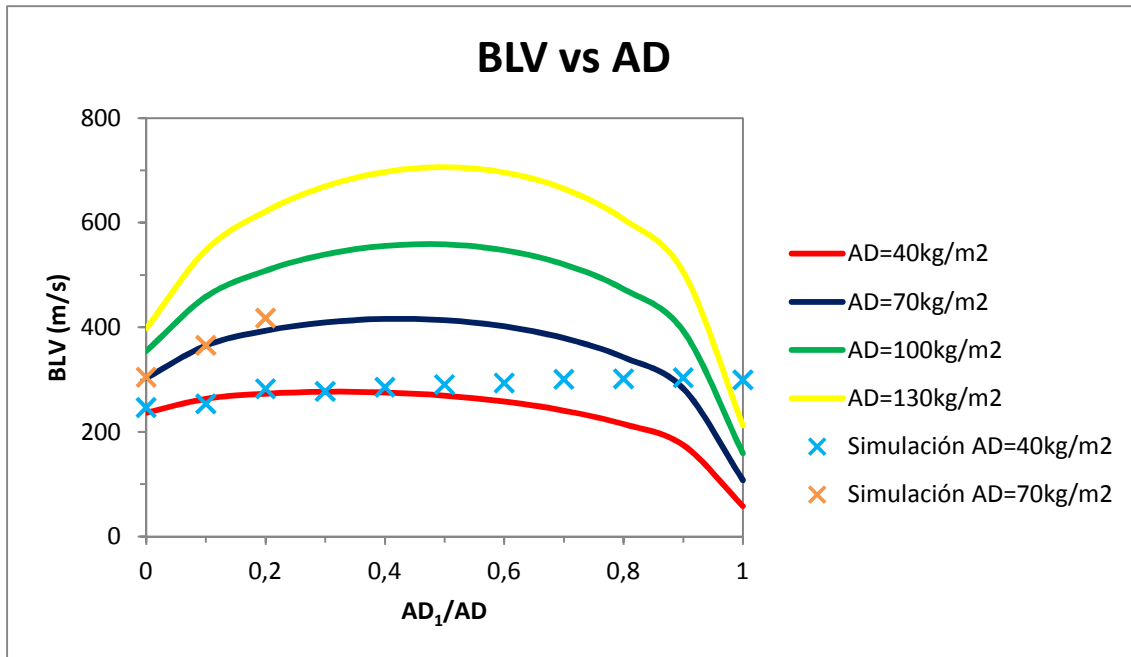


Figura 5.3.2.- Velocidad en el límite balístico (BLV) en función de la densidad areal normalizada de la placa frontal cerámica (Resultados analíticos, ec. Velocidad de límite balístico (p. 90), y simulados).

En la Figura 5.3.2 se han representado las curvas analíticas para cuatro densidades areales de blindaje (40 kg/m^2 , 70 kg/m^2 , 100 kg/m^2 , 130 kg/m^2) y se han añadido los valores obtenidos con el modelo numérico para $AD = 40 \text{ kg/m}^2$ y algunos de los valores calculados para $AD = 70 \text{ kg/m}^2$.

De igual manera que con los espesores totales, en la Figura 5.3.2 se puede apreciar la certeza del modelo cuando el metal es predominante y la falta de precisión cuando comienza a imponerse el cerámico. Las razones de esto son probablemente las mismas que las expuestas para las anteriores curvas.

En definitiva, analizando estos resultados queda a la vista la necesidad de mejorar y afinar el modelo cerámico para cualquier estado de carga y de condiciones de contorno.

La suma de puntos de simulación aportados, se ha visto limitada por la cantidad de tiempo necesaria para simular los límites balísticos de cada espesor (un mínimo de 3/4 simulaciones de 20 minutos por cada punto representado) y la falta del mismo para poder realizarlo.

CAPÍTULO 6: PRESUPUESTO

6.1.- Presupuesto del proyecto

En el presente capítulo se expone el presupuesto básico necesario para la conclusión del modelo numérico expuesto. Dichos gastos básicos se han agrupado en un solo bloque llamado *Gastos Totales*. Este bloque incluye: el coste de las licencias necesarias, los equipos utilizados, las instalaciones, y su mantenimiento, y el coste de la mano de obra del ingeniero contratado.

La licencias utilizadas han sido el código comercial Abaqus, para el cálculo de elementos finitos (1000€/año, del cual se añade la fracción proporcional al tiempo de empleo para este trabajo), y el paquete de *Microsoft Office*, para el desarrollo de la memoria y otros cálculos (160€).

Se han empleado dos equipos, un servidor especializado de trabajo, de 16 núcleos, en el que se han realizado los cálculos de elementos finitos (5000€, se le ha supuesto una vida de dos años) y un ordenador personal para el desarrollo de la memoria (500€, se ha considerado una amortización de dos años).

En cuanto a las instalaciones, se ha incluido el precio del alquiler del local utilizado como oficina (200€/mes), el agua y la electricidad gastada, en luz y otros usos (150€/mes), y el mantenimiento y la limpieza de dicho local (100€/mes).

Se ha estimado un sueldo medio de 20€/h como mano de obra del ingeniero contratado para la ejecución del proyecto. El ingeniero ha trabajado todos los días laborables durante cuatro meses a media jornada (4h/día).

Se recoge de manera simplificada el presupuesto total del proyecto en la Tabla 6.1.1.

Presupuesto Total		
Concepto	Duración	Cantidad
Gastos Totales	4 meses	9610€
6% Beneficio Industrial	-	576,6€
21% I.V.A.	-	2018,1€
Total	4 meses	12204,7€

Tabla 6.1.1.- Presupuesto total para la ejecución del modelo numérico.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

7.1.- Conclusiones

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado ha sido entender y analizar el comportamiento de los blindajes de doble capa con carga cerámica bajo solicitaciones dinámicas impulsivas de alta velocidad. Con este fin se ha diseñado un modelo numérico en el código comercial Abaqus. Durante su desarrollo y aplicación a diferentes casos de impacto se han concluido distintas ideas:

- Se ha realizado una validación del modelo, comparando de los resultados experimentales obtenidos por Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela en 2009. Se ha expuesto una comparación de la velocidad y longitud residual del proyectil para cuatro blindajes cerámico/metálicos (alúmina/aluminio) de diferentes espesores. Comprobando que tras las simulaciones los errores máximos entre resultados no diferían más de un 11%, se concluye que el modelo numérico diseñado dispone de una precisión adecuada para su aplicación en otros casos de estudio.
- Se ha analizado en especial el comportamiento del material cerámico, pues los modelos de fallo de este tipo de materiales llevan un tiempo escaso en uso. Se han podido comprobar algunos resultados acordes con los obtenidos en ensayos reales como la formación del cono cerámico de 60-70° y los contornos de daño que lo forman, así como una alta erosión en la zona Mescal.
- Se han comparado los blindajes expuestos por Sánchez Gálvez y Sánchez Paradela en 2009 entre sí. De esta manera se ha podido observar el blindaje más rentable y eficaz, tanto en términos balísticos como económicos. Se ha comprobado que no siempre el blindaje más pesado es el más protector.
- Se ha calculado, también con el modelo, el límite balístico de cada uno de los blindajes propuestos. Y se ha comparado la evolución de la velocidad residual en función de la velocidad de impacto con las curvas analíticas propuestas por Lambert y Jonas en 1976.
- Se han calculado las deceleraciones del proyectil para cada una de las armaduras, habiéndose evaluado la fuerza media que ejercen sobre el proyectil.

El carácter azaroso de los impactos, especialmente a alta velocidad, abre un campo interesante con impactos no normales a la superficie de los blindajes. Así pues, se ha modelizado una serie de impactos oblicuos, tanto para diferentes espesores de placa como para diferentes ángulos de impacto. Se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Aumentando el ángulo de impacto y el espesor del blindaje no siempre se consigue disminuir la velocidad residual. A pesar de recorrer un área mayor de las placas y verse más erosionado, el proyectil en ciertos casos sale despedido a una velocidad mayor que en casos con menos densidad areal.
- Para ciertos espesores los resultados no son fieles, lo que pone en entredicho la fiabilidad del modelo para algunos impactos oblicuos.
- El ángulo de impacto adquiere un valor fundamental en el estudio de impactos a alta velocidad. Se concluye que es esencial el análisis en detalle del comportamiento de los blindajes ligeros bajo sollicitaciones dinámicas oblicuas.

Finalmente, se ha realizado una comparación de nuestros resultados numéricos con las curvas analíticas para el cálculo de la velocidad de límite balístico presentadas por R. Chi en 2013. De este análisis se ha concluido:

- Cuando el espesor de la placa cerámica es el factor predominante en el problema, los resultados numéricos difieren proporcionalmente a dicho espesor, probablemente por un aumento de la rigidez no deseado. Por consiguiente, se estima que se ha de seguir trabajando para simular más adecuadamente el material cerámico, bien cambiando ciertas condiciones de contorno o bien modificando algún parámetro intrínseco a él.
- Para los casos en que la relación de espesores cerámica/metal no supere el 50% los resultados son fieles a los de la representación analítica de las curvas mencionadas. Por consiguiente, la simulación del material metálico tiene un buen comportamiento, tanto de manera aislada como en conjunto con el material cerámico.

7.2.- Trabajos futuros

Para la ampliación del estudio del comportamiento de los blindajes de doble capa con carga cerámica, como los expuestos en el presente Trabajo Fin de Grado, se han pensado en diversos trabajos a realizar en un futuro:

- Mejorar el refinamiento de los cálculos para todos los casos, a excepción quizás de los primeros resultados con los que se hizo la validación inicial.
- Hacer todas las simulaciones con la geometría real del proyectil, sin simplificarlo como un cilindro. De esta manera podremos observar la diferencia de resultados entre ambos casos.
- Mejorar los parámetros utilizados para el material cerámico de manera que el comportamiento del modelo numérico se asemeje en mayor medida al observado experimentalmente. Así pues, se puede realizar un estudio para establecer los parámetros a utilizar en el modelo JH-2 de la alúmina, ya que existe una diversidad de ellos según diferentes autores.
- Se necesita trabajar más en el diseño y el modelado de los impactos oblicuos expuestos. Para ciertos casos los errores superan el 70%, siendo necesario un refinamiento del modelo.
- Realizar cálculos más precisos para las curvas de velocidad de límite balístico. Sobre todo estudiar con mayor atención las razones de la diferencia de resultados cuando la placa cerámica comienza a ser predominante.
- Realizar nuevas simulaciones con diferentes materiales de respaldo, comparando los resultados y viendo cuales pueden ser más eficientes.
- Probar nuevos materiales cerámicos y verificar el buen comportamiento del modelo de daño empleado.
- Comparar la desviación de los resultados que se obtendrían con diferentes modelos de daño, tanto para materiales metálicos como cerámicos.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Abrate, S. (2011), *Impact engineering of composite structures*, Carbondale, USA: Springer.
- Acosta Sullcahumán, J. A. (2011), *Fractura de materiales poliméricos a altas velocidades de sollicitación*, Tesis doctoral, Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- AENOR, (1992), *Metallic materials. Charpy impact test. Part 1: Test method*, UNE 7475-1:1992, , Brussels, Belgium: CEN.
- AENOR, (2011), *Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 1: Test method*, ISO 148-1:2011, Brussels, Belgium: CEN.
- American Society for Testing and Materials, (1977), *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, ASTM A370, Philadelphia, USA: ASTM.
- Arias Hernández, A. (2002), Desarrollo y modelización del comportamiento frente a impacto de materiales compuestos de matriz polimérica y carga cerámica, Tesis doctoral, Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Bless, S. J., Rosenberg, Z., Yoon, B., (1987), "Hypervelocity penetration of ceramics", en *Int. J. Impact Engng.*, 5, 165-171. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).
- Callister, W. D. (2009), *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Barcelona: Reverté.
- Cepeda, J. (2004), *Mejoras al diseño de mezclas asfálticas mediante el ensayo de compresión diametral*, México D. F., México.
- Chi, R. et al. (2013), "Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: a semi-analytical approach" en *Int. J. of Impact Engng.*, 52, 0, 37-46.
- Cortés R., Navarro C., Martínez M. A., Rodríguez J., Sánchez-Gálvez V. (1992), "Modelling of the behaviour of ceramic faced armours under impact loading", en *Proceedings on the 13th International Symposium on Ballistics*, Estocolmo, Suecia, 127-134. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera)

- Cronin, D. S. et al. (2003), "Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna" en *4th European LS-DYNA Users Conference*, Ulm, Alemania.
- Curran D. R., Seaman L., Cooper T., Shockey D. A. (1993), "Micromechanical model for comminution and granular flow of brittle material under high strain rate. Applications to penetration of ceramics targets" en *Int. J. Impact Engng.*, 13, 1, 53-83. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).
- Dassault Simulia, *Abaqus Documentation 6.14*.
<<http://50.16.225.63/v6.14/>>[Consulta: Junio de 2015]
- Del Metal S.A., *Aluminio 5083*.
<<http://www.delmetal.com.ar/productos/aluminio/5083.pdf>> [Consulta: Julio de 2015]
- Drucker, D. C. and Prager, W. (1952). "Soil mechanics and plastic analysis for limit design" en *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 10, no. 2, pp. 157–165.
- Feli, S., Asgari, M. R., (2011), "Finite element simulation of ceramic/composite armor under ballistic impact" en *Composite: Part B*, 42, 4, 771-780.
- Fernández, D. y Zaera, R. (2008). "A new tool based on artificial neural networks for the design of lightweight ceramic-metal armour against high-velocity impact of solids", en *Int. J. of Solids and Structure*, 45, 6369-6383.
- Jenkins, C. (1985), "Pasado, presente y futuro de los carros de combate", *Revista Internacional de Defensa*, Ginebra, Suiza: Interavia S. A. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).
- Johnson, G. R. y Cook, W. H. (1983), "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain and high temperatures", en *Proceedings en the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, Netherlands.
- Johnson, G. R. y Holmquist, T. J. (1994), "An improved computational constitutive model for brittle materials" en *AIP Conference Proceedings*, 309, 1, 981-984.

- Johnson, G. R., Cook, W. H. (1985), "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures", en *Engng. Fracture Mechanics*, 21, 1, 31-48.
- Kennedy, P. (2014), *Ingenieros de la victoria*, Barcelona, España: Debate.
- Lambert, J. P., Jonas, G. H. (1976), "Towards standardization in terminal ballistics testing: velocity representation" en *USA Ballistics Research Laboratories*, Aberdeen, Maryland, USA.
- Lamo Arango, J. R., Zahr Viñuela, J., (2014), "Material de clase; Tema 1: Comportamiento Mecánico de los Materiales" en *Mecánica de Sólidos; Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras*, UC3M, Madrid, España.
- Ogorkiewickz, R. M. (1995), "Development of lightweight armour systems", en *Proceedings Lightweight Armour Systems Symposium*, Royal Military College of Science, Cranfield, England.
- Pérez, F., Miró, R. y Martínez, A. (2006), "Ensayos de Mezclas bituminosas: nuevos criterios" en *XVII Seminario de Ingeniería de Carreteras*, Zaragoza, España.
- Prakash, A. et al. (2013), "Influence of adhesive thickness on high velocity impact performance of ceramic/metal composite targets", en *Int. J. of Adhesion & Adhesives*, 41, 186-197.
- Quesada Sanz, F. (2009), "*Ultima ratio regis: Control y prohibición de las armas desde la Antigüedad a la Edad Moderna*", Madrid, España: Polifemo.
- Riou, P. et al., (1994), "Impact damage on silicon carbide: firts results", en *Journal de Physique IV*, 4, 281-287. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).
- Rosenberg, Z., Dekel, E., Yeshurun, Y., Bar-On, E. (1995), "Experiments and 2-D simulations of high velocity penetrations into ceramic tiles" en *Int. J. Impact Engng.*, 17, 696-706. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).
- Sánchez Gálvez, V. y Sánchez Paradela, L. (2009). "Analysis of failure of add-on armour for vehicle protection against ballistic impact", en *Engng. Failure Analysis*, 16, 6, 1837-1845.

Senf, H., Strassburger, E., Rothenhäusler H., (1994), "Stress wave induced damage and fracture in impacted glasses", en *Journal de Physique*, 3, 741-746. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).

Serjoui, A. et al. (2015), "Experimental validation of BLV model on bi-layer ceramic-metal armor" en *Int. J. of Impact Engng.*, 77, 30-41.

Shockey, D. A. et al., (1990), "Failure phenomenology of confined ceramic targets and impacting rods", en *Int. J. Impact Engng.*, 9, 3, 263-275. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).

Steinberg, D. J., Cochran, S. G. y Guinan M. W. (1980), "Constitutive model for metals applicable at high strain rates", *J. Appl. Phys.*, 51,3, 1498-1504. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera)

Strassburger, E., Senf, H., Rothenhäusler H., (1994), "Fracture propagation during impact in three of ceramics", en *Journal de Physique*, 3, 653-658. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).

Universidad Carlos III de Madrid, *Capítulo 1. Introducción a los materiales compuestos.*

<<http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/materiales-compuestos/capitulo1.pdf/view>> [Consulta: Julio de 2015]

Universidad Carlos III de Madrid, *Capítulo 13: Comportamiento de componentes estructurales bajo cargas impulsivas.*

<http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/elasticidad-resistencia-de-materialesii/material-de-clase-1/CAPITULO_13.pdf> [Consulta: Junio de 2015]

University of Virginia, Wadley Research Group, *Ballistic Impact Mechanisms of Materials.*

<<http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/ballistic-impact.html>> [Consulta: Agosto de 2015]

Wilkins M. L. (1978), "Mechanics of Penetration and Perforation" en *Int. J. Impact Engng.*, 16, 793-807. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).

- Williams, J.G. (1984), *Fracture mechanics of polymers*, Chichester, England: Ellis Horwood Limited. (Citado en la Tesis Doctoral de Julio A. Acosta Sullcahuamán)
- Wilson D., Hetherington J. G. (1995), Analysis of Ballistic Impact on Ceramic Faced Armour using High Speed Photography”, en *Proceedings Lightweight Armour System Symposium*, Royal Military College of Science, Cranfield, England. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera)
- Zaera Polo, R. (1997), *Modelo analítico para el diseño de sistemas de protección frente a impacto formado por paneles de cerámica/metal*, Tesis doctoral, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Zerilli F. J., Armstrong R. W. (1987), “Dislocation mechanics-based Constitutive relations for material dynamic calculation”, *J. Appl. Phys.*, 61, 5, 1816-1825. (Citado en la tesis doctoral de Ramón Zaera).
- Zukas, J. A. et al. (1992), en “*Impact Dynamics*”, Malabar, Florida, USA: Krieger Publishing Company.

APÉNDICE A: Programación del material cerámico en el archivo de datos generado por Abaqus

Se expone el extracto del archivo “.inp” escrito, en el que se definen las propiedades de la alúmina usada en este modelo.

```
*****
*Material, name=abq_jh2_Alumina
*Density
3.89e-9
*Depvar, delete=8
8,
*User Material, constants=32
3.89e-9, 1.52e5, 0.88, 0.64, 0.28, 0.6, 7e-3, 1
262, 12200, 5000, 8300, 1460, 1, 0, 0
0.01, 0.7, 10, 0, 0.5, 0, 0, 0
2.31e5, -1.6e5, 2.77e6, 0, 0, 0, 0, 0
*****
```

A continuación se presenta la sinopsis del interfaz utilizado para modelar la alúmina con el criterio Johnson-Holmquist, señalando cada uno de los parámetros (Simulia-Dassault Systèmes). Se añade además una breve descripción en las tablas 3.3.4 - 3.3.8 de todos ellos.

```
*****
*MATERIAL, NAME=ABQ_JH2
*DENSITY
ρ
*USER MATERIAL, CONSTANTS=32
** Line 1:
ρ0, G, A, N, B, M, C, ε̇0
** Line 2:
T, σimax, σfmax, HEL, PHEL, β
** Line 3:
D1, D2, ε̃f,maxpl, ε̃f,minpl, FS, lDamage
** Line 4:
K1, K2, K3
*DEPVAR, DELETE=8
8
1, PEEQ, "Deformación plástica equivalente"
2, PEEQ_RATE, "Velocidad de deformación plastic equivalente"
3, DUCTCRT, "Criterio de inicio de daño dúctil"
4, DAMAGE, "Daño variable"
5, DELTAP, "Incremento de presión debido a compresión"
6, YIELD, "Límite elástico"
7, EVOL, "Deformación volumétrica, Mu"
8, MPSTATUS, "Estado en un punto del material"
*****
```

Posición	Símbolo	Descripción
1 (1)	ρ_0	Densidad de referencia del material
2 (2)	G	Módulo de cortadura
3 (3)	A	Parámetro de esfuerzo intacto normalizado
4 (4)	N	Parámetro de esfuerzo intacto (exponente de presión)
5 (5)	B	Parámetro de esfuerzo fracturado normalizado
6 (6)	M	Parámetro de esfuerzo fracturado (exponente de presión)
7 (7)	C	Parámetro del esfuerzo dependiente de la velocidad de deformación
8 (8)	$\dot{\epsilon}_0$	Velocidad de deformación de referencia

Tabla A.1.- Parámetros de la línea 1 del modelo cerámico.

Posición	Símbolo	Descripción
1 (9)	T	Tensión de tracción hidrostática máxima
2 (10)	σ_i^{max}	Esfuerzo intacto normalizado máximo
3 (11)	σ_f^{max}	Esfuerzo de fractura normalizado máximo
4 (12)	HEL	Esfuerzo compresivo neto para el límite elástico de Hugoniot (HEL)
5 (13)	P_{HEL}	Componente de presión en HEL. Si no se especificara se derivará de HEL .
6 (14)	β	Fracción de la energía elástica perdida convertida en energía hidrostática.
7-8 (15-16)		No se usan

Tabla A.2.- Parámetros de la línea 2 del modelo cerámico.

Posición	Símbolo	Descripción
1 (17)	D_1	Parámetro de fractura por deformación plástica
2 (18)	D_2	Parámetro de fractura por deformación plástica (exponente)
3 (19)	$\bar{\epsilon}_{f,max}^{pl}$	Desplazamiento máximo para fallo
4 (20)	$\bar{\epsilon}_{f,min}^{pl}$	Desplazamiento mínimo para fallo
5 (21)	FS	Criterio de fallo, FS: $FS < 0 \rightarrow$ fallo si $(P'+T') < 0$ (fallo por tracción) $FS = 0 \rightarrow$ sin fallo (predeterminado) $FS > 0 \rightarrow$ fallo si $PEEQ > FS$
6 (22)	$lDamage$	Tipo de daño: $lDamage = 0 \rightarrow$ daño progresivo (JH-2) $lDamage = 1 \rightarrow$ daño instantáneo (JH-1)
7-8 (23-24)		No se usan

Tabla A.3.- Parámetros de la línea 3 del modelo cerámico.

Posición	Símbolo	Descripción
1 (25)	K_1	Módulo de compresibilidad
2 (26)	K_2	Segundo coeficiente de presión
3 (27)	K_3	Tercer coeficiente de presión
4-8 (28-32)		No se usan

Tabla A.4.- Parámetros de la línea 4 del modelo cerámico.

Variable de salida	Símbolo	Descripción
SDV1	$\bar{\varepsilon}^{pl}$	Deformación plástica equivalente, PEEQ
SDV2	$\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$	Velocidad de deformación plástica equivalente
SDV3	ω	Criterio de inicio de daño
SDV4	D	Daño variable
SDV5	ΔP	Incremento de presión debido a compresión
SDV6	Σ	Límite elástico
SDV7	μ	Deformación volumétrica, $\mu = \frac{\rho}{(\rho_0-1)}$
SDV8	$MpStatus$	Estado puntual del material: 1 si está activo, 0 si ha fallado

Tabla A.5.- Opciones de salida de los elementos para el modelo cerámico.